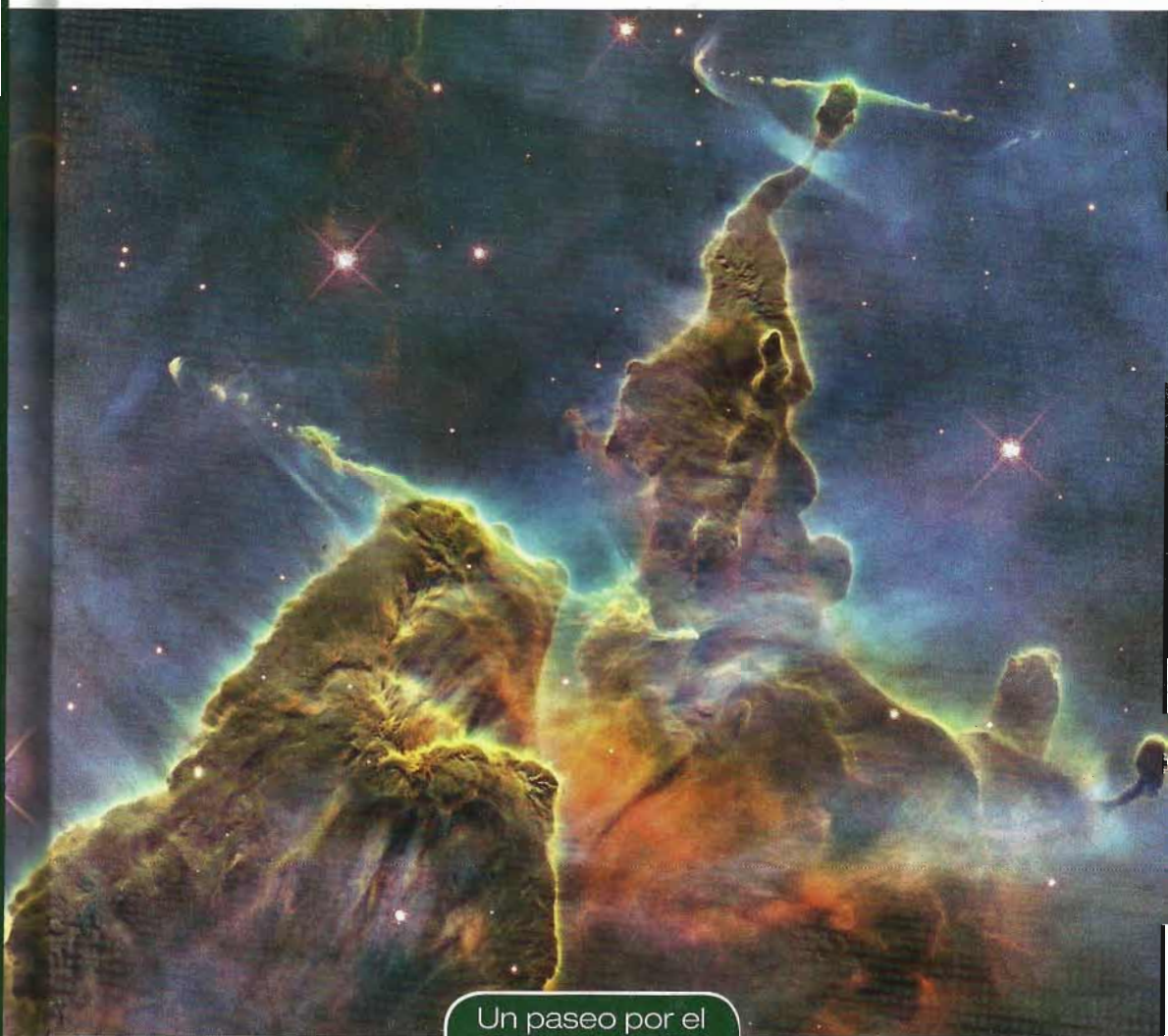


Los límites del universo

Explorando lo desconocido



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmourea.blogspot.com/>

Los límites del universo

Explorando lo desconocido

RBA

Imagen de cubierta: Imagen obtenida por el telescopio espacial Hubble en 2010 de la denominada «Montaña Mística», una gigantesca nube de gas y polvo situada en Carina Nébula, un vivero de estrellas a 7500 años-luz de la Tierra.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Miguel Ángel Sanchis Lozano por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: AGE Fotostock: 37a, 83a, 125; ALMA (ESO/NAOJ/NRAO): 45; Andrés Aguiluz Ríos/ Wikimedia Commons: 27; Brookhaven National Laboratory/ Wikimedia Commons: 83b; Julian Herzog/ Wikimedia Commons: 81; Lunch/ Wikimedia Commons: 140; Melirius/ Wikimedia Commons: 61; NASA, ESA, J. Hester (Arizona State University): 35; NASA: 104ad; NASA/ESA: 37b; NASA/ JPL-Caltech/NASA: 105ai; NASA/ JPL-Caltech/ R. Hurt (IPAC): 105ad; Pachango/ Wikimedia Commons: 44; S13mashina/ Wikimedia Commons: 104ai; WMAP Science Team/ NASA: 42

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-9087-8
Depósito legal: B-22066-2017

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	El macrocosmos 13
CAPÍTULO 2	El microcosmos 51
CAPÍTULO 3	El origen del universo 87
CAPÍTULO 4	El destino final del universo 119
LECTURAS RECOMENDADAS	153
ÍNDICE	155

Hace más de dos mil años Aristóteles afirmaba que, por naturaleza, el ser humano desea saber. El naturalista sueco Carlos Linneo lo tuvo muy presente cuando, en 1758, clasificó dentro del orden de los primates a nuestra especie como *Homo sapiens*, tomando del latín los vocablos *homo*, que designaba lo «humano», y *sapiens*, «sabio». Etimológicamente, *homo* y *humus* comparten la misma raíz indoeuropea, según la creencia ancestral de que provenimos de la tierra o lodo (*humus*) al que retornamos con la muerte.

Sin embargo, los griegos se referían al ser humano como *anthropos*, «el que alza los ojos hacia lo alto». Destacaban así un rasgo característico de nuestra especie: es el único ser vivo sobre la faz de la Tierra capaz de observar conscientemente las estrellas del firmamento admirando su belleza, e interrogarse por el sentido de la vida y el destino del universo.

El ser humano es, al mismo tiempo, *homo* y *anthropos*, tierra y cielo. No podemos renunciar a ninguna de las dos facetas. Y, como *sapiens*, hemos de intentar conocer y entender tanto lo pequeño, el microcosmos, como lo grande, el macrocosmos; hoy es imposible avanzar en el conocimiento en un campo sin

hacerlo en el otro. El físico y premio Nobel Richard Feynman lo ilustró poéticamente: «Un poeta dijo una vez: "El universo entero cabe en una copa de vino"»; y proseguía: «Si bien, por conveniencia, nuestras pequeñas mentes dividen esta copa de vino, este universo, en partes —física, biología, geología, astronomía, psicología— ¡recordemos que la naturaleza no lo sabe!».

En este libro exploraremos las fronteras de lo (des)conocido, los límites actuales del conocimiento del universo. Oscilaremos entre el microcosmos y el macrocosmos, en un viaje virtual desde las galaxias más lejanas y las grandes estructuras del universo observable, hasta el corazón mismo de la materia, sus constituyentes y fuerzas fundamentales.

La física cuántica gobierna el microcosmos, que se puede identificar con el mundo atómico y subatómico, mientras que la física clásica —gravedad y mecánica de Newton y electromagnetismo de Maxwell— se aplica al macrocosmos, que se corresponde con objetos de mayor tamaño. A la espera de una teoría común, válida para el microcosmos y el macrocosmos, hay que tener especial cuidado con el lenguaje físico utilizado en cada dominio.

Es bien conocida la paradoja de Schrödinger. Imaginemos un gato encerrado dentro de una caja que contiene un veneno que se puede liberar (o no) mediante un dispositivo aleatorio cuántico. ¿Podría estar el gato vivo y muerto al mismo tiempo, hasta que abramos la caja y lo observemos? Mediante este planteamiento provocador, Schrödinger pretendía señalar lo absurdo de extrapolar, sin matizaciones, la interpretación cuántica al mundo macroscópico. Los gatos, como otros objetos macroscópicos vivos o no, tales como bacterias, aviones o planetas, son cuerpos complejos, pero globalmente clásicos, es decir, en general se pueden describir sus propiedades y movimiento sin apelar a la teoría cuántica. Sin embargo, hay que reconocer que el límite entre el mundo clásico y el cuántico no siempre está claramente definido. Por ejemplo, puede haber objetos «grandes» que se han de describir cuánticamente. Así, dos electrones separados muchos kilómetros pueden, no obstante, estar entrelazados cuánticamente, con sorprendentes efectos observables desde el punto de vista clásico.

Por otro lado, la teoría de la relatividad general de Einstein está formulada para describir las interacciones gravitatorias entre cuerpos, siendo una teoría clásica, no cuántica. Sin embargo, la gravedad de Einstein, siendo una generalización de la anterior ley de Newton de la gravitación universal, supone muchísimo más: es uno de los mayores logros intelectuales en la historia de la ciencia y un cambio de paradigma en la física. El espacio-tiempo, ¡la geometría!, deja de ser un marco pasivo, en el que se describen las leyes físicas, para adquirir un papel dinámico, generador de movimiento.

Disponemos, por tanto, de dos dominios aparentemente regidos por leyes diferentes. Por un lado, la gravedad puede ser prácticamente ignorada en el microcosmos —debido a las minúsculas masas de los constituyentes básicos de la materia—, mientras que la teoría de la relatividad general de Einstein gobierna el mundo del macrocosmos, dictando el movimiento de planetas y galaxias, que tienen una masa mucho mayor. Con el descubrimiento en las últimas décadas de la expansión acelerada del universo, y la consecuente introducción de la energía oscura, la propia teoría general de la relatividad ha debido ser revisada para explicar tales observaciones. ¿Cuál es el origen de esa energía oscura? ¿Se debe a fluctuaciones cuánticas del vacío? Son preguntas en el aire que apuntan directamente a la interrelación entre el microcosmos y el macrocosmos, entre la gravedad y la mecánica cuántica.

En efecto, hay situaciones en las cuales la teoría cuántica y la gravedad no se pueden ignorar mutuamente; es el caso de los primeros instantes del universo tras el Big Bang, cuando materia y energía estaban confinadas en una pequeñísima región del espacio: micro y macrocosmos eran el mismo cosmos. O en los agujeros negros, donde las trayectorias de cualquier partícula, incluida la luz, es curvada por la gravedad hacia su interior y nada puede escapar... excepto si se consideran fluctuaciones cuánticas que dan lugar a la radiación de Hawking. En tales circunstancias extremas es necesaria una teoría que describa, conjuntamente, los fenómenos cuánticos y gravitatorios, pues ¡la naturaleza lo lleva a cabo!

Sin embargo, la relatividad general se resiste a ser cuantizada por los físicos, a diferencia del electromagnetismo clásico, que

al ha podido cuantizarse y cuyos cuantos de energía se denominan fotones. No es tarea fácil en absoluto cuantizar la gravedad de manera consistente partiendo de las ecuaciones clásicas de la relatividad general mediante un procedimiento semejante al del electromagnetismo. Ha habido numerosos intentos de conseguirlo. El más desarrollado sin duda es la teoría de cuerdas, aspirante a teoría del todo, que integra al gravitón (cuanto de la gravedad cuántica) junto al fotón, como un modo de oscilación más de una cuerda, constituyente básico tanto de la materia como de la interacción.

Pese al éxito prometedor de la teoría de cuerdas —unificar la gravedad con el resto de fuerzas fundamentales y explicar conjuntamente todas las partículas elementales—, su evolución y desarrollo teórico posterior ha conducido a preguntas inquietantes en relación con la praxis científica habitual. Nos referimos a la posibilidad del multiverso y el principio antrópico: una colección prácticamente infinita de soluciones de la teoría de cuerdas, cada una realizable en una versión de universo. No hay razón alguna para que los valores de las constantes universales y las leyes físicas sean los que son. En otra versión del universo serán diferentes, y pueden darse (casi) todas las opciones. Si habitamos en un universo que permite la vida es pura casualidad, ya que no podemos vivir en un universo que no permita la vida!

¿Estamos, pues, frente al fin de la ciencia empírica? Hasta la fecha, la razón humana ha cosechado éxito tras éxito aplicando el método científico: dado un cierto fenómeno que se desea estudiar, se formulan una serie de hipótesis utilizando un lenguaje matemático, seguidas de una necesaria comprobación experimental, el crisol de la ciencia. Ambas etapas conforman más bien un bucle, pues resultados experimentales inesperados pueden dar lugar a nuevas hipótesis, incluso hacer emerger nuevas teorías.

¿Proseguirá el éxito de la ciencia y la razón humana indefinidamente, o encontraremos un límite para nuestra comprensión del universo, como en el fondo sugiere la teoría de cuerdas? Si existe tal frontera, ¿será consecuencia de las limitaciones de nuestra mente? ¿Juega la naturaleza a los dados con nosotros,

sin que lleguemos a conocer completamente las reglas del juego? O quizá no haya frontera, y encontremos una bella teoría final que explique por qué los valores de sus parámetros están tan bien ajustados como para permitir el desarrollo de la vida, en particular de la vida inteligente en nuestro universo.

Invitamos al lector a adentrarse seguidamente en los dos primeros capítulos, para conocer los límites actuales de conocimiento de las estructuras del universo y su evolución, así como sus constituyentes elementales y las leyes fundamentales que los rigen. Examinaremos la época tras el periodo inflacionario, que estiró el espacio de manera exponencial tras el Big Bang, en la que emergió la materia y la radiación como un plasma muy denso y caliente de quarks, electrones y fotones. A medida que bajaba la temperatura del plasma, se formaron estructuras más complejas, como protones y neutrones y, finalmente, átomos neutros, originando esa «instantánea» del universo primitivo que ha perdurado hasta nuestros días como el fondo cósmico de microondas y que tanta información ha aportado a astrofísicos y cosmólogos.

La formación de las estrellas primitivas, la nucleosíntesis de los metales, los primeros agujeros negros supermasivos y la evolución del universo hasta alcanzar la estructura a gran escala actual serán también objeto de nuestra atención. Actualmente se utilizan potentes telescopios, radiotelescopios, satélites y otras técnicas para explorar la frontera del universo más lejano —y más antiguo—, con un extraordinario éxito.

Análogamente, para el estudio de las partículas elementales del mundo subatómico se precisa de grandes instalaciones (aceleradores y detectores) que actúan como microscopios de altísima resolución, complementando la exploración del macrocosmos. Lo trataremos en este libro, así como las teorías o modelos que intentan explicar un sinnúmero de observaciones recogidas hasta el momento, que constituyen el modelo estándar de partículas y el cosmológico, así como sus extensiones y alternativas.

A lo largo del libro también abordaremos cuestiones fundamentales, científicas, filosóficas y, por qué no admitirlo, algunas en el linde con las creencias religiosas. Por ejemplo, en los dos últimos capítulos analizaremos el inicio y el posible final del uni-

verso, con un abanico de opciones diferentes, desde un destino final «tranquilo» hasta un ocaso violento.

Podría algún lector crítico pensar que tales cuestiones son meras especulaciones fuera del alcance actual de la ciencia y de la tecnología, incluso que permanecerán sin contestación definitiva para siempre. Es posible que así sea, o puede que se hallen respuestas inesperadas. En cualquier caso, el deseo de saber del ser humano es irrefrenable; por algo nos hemos bautizado a nosotros mismos, quizá pretenciosamente, como *Homo sapiens*.

El macrocosmos

El universo, según las evidencias aportadas hasta ahora por las observaciones astronómicas y astrofísicas, surgió de una gran explosión y evolucionó hasta su actual estructura a gran escala. Sin embargo, este conocimiento está lejos de ser completo o definitivo. Nuevas técnicas de exploración del cosmos tendrán mucho que decir aún sobre el origen del universo.

Según la teoría del Big Bang o Gran Explosión, el universo ha pasado por tres fases bien diferenciadas, cada una con distintas etapas, hasta llegar al presente.

La primera transcurrió durante una minúscula fracción de segundo, cuando los efectos cuánticos dominaban completamente el universo. No se dispone de una descripción medianamente satisfactoria para ella, por carencia de observación directa y de un marco teórico que aúne gravedad y física cuántica de forma consistente. No obstante, existen razones fundamentadas para suponer que el tamaño del universo creció de forma vertiginosa, pasando del tamaño de un átomo al de una naranja en menos de una trillonésima de segundo, en un extraordinario proceso conocido como *inflación cósmica*. Pese a su brevedad, esta fase fue esencial para la evolución posterior del universo, que dio lugar a las estructuras que conocemos actualmente tanto en el microcosmos como en el macrocosmos.

En una fase posterior, aparecieron la materia (partículas con masa) y la radiación (fotones), diferenciándose los distintos tipos de interacciones: gravitatoria, electrodébil y fuerte. A medida que el universo crecía y se enfriaba, tuvo lugar la

combinación de núcleos y electrones, formándose átomos neutros. Los fotones pudieron entonces propagarse libremente: el

Si el Señor Todopoderoso me hubiera consultado antes de embarcarse en la creación, yo habría aconsejado algo más simple.

ALFONSO X EL SABIO

universo se hizo transparente a la luz. Esa primera luz nos sigue llegando hoy y forma lo que conocemos como fondo cósmico de microondas.

Por último, durante una tercera fase muchísimo más larga, que se prolonga hasta el presente, se formaron las estructuras a gran escala del universo, esencialmente bajo la

acción de la gravedad y con el concurso necesario de un tipo de materia que hasta ahora no ha sido detectada directamente: la denominada materia oscura.

OBSERVANDO EL UNIVERSO A OJO DESNUDO

Los antiguos astrónomos, hasta la llegada de Galileo Galilei, carecían de cualquier tipo de instrumento para la observación del cielo y debían confiar en su vista, paciencia y minuciosidad para encontrar los patrones de regularidad del movimiento de los astros y así confeccionar tablas astronómicas. Por ello, la astronomía se desarrolló inicialmente en culturas meridionales, con buen clima, desde los griegos hasta los mayas, resultando asombroso el grado de precisión alcanzado por generaciones de astrónomos. Por citar dos ejemplos, Eratóstenes de Cirene (276 a.C.-194 a.C.) determinó el radio de la Tierra con sorprendente aproximación, así como las distancias entre la Tierra, la Luna y el Sol. Por su parte, Aristarco de Samos (310 a.C.-230 a.C.) propuso un modelo heliocéntrico, anticipándose en casi dos milenios a Nicolás Copérnico (1473-1543).

Sin embargo, el sistema astronómico heliocéntrico, revolucionario entonces, no fue aceptado en la antigüedad. La idea de que la Tierra se moviera y no fuera el centro del universo, resultaba inaceptable y parecía estar en contradicción tanto con el sentido común como con la experiencia cotidiana. En efecto, se po-

NUESTRO LUGAR EN EL UNIVERSO

Los antiguos e imaginativos griegos compaginaban la racionalidad de la filosofía con las explicaciones antropomórficas sobre la naturaleza. El nombre de Vía Láctea es la versión latina del término griego *galaxia*, donde *gala* significa «leche», pues el mito clásico atribuía el origen de la Vía Láctea a la leche de la diosa Hera. Por otro lado, el filósofo Demócrito ya auguró que nuestra galaxia podría estar formada por muchas estrellas. Su intuición abarcaba de lo más pequeño a lo más grande, anticipando lo que la ciencia moderna lleva en su seno: una descripción unificada del micro y del macrocosmos.

La Vía Láctea: hogar, dulce hogar

Hoy sabemos que nuestra galaxia, espiral y con un diámetro medio de unos cien mil años-luz, contiene varios centenares de miles de millones de estrellas (10^{11}), un número similar al de neuronas de un cerebro humano. En la actualidad está formada por el bulbo central, el disco (con dos largos brazos curvos con estrellas, polvo y gas) y el halo (con una gran cantidad de materia oscura). Sin embargo, en sus orígenes era totalmente diferente. Se formó en dos etapas bien diferenciadas. La primera fue rápida y en ella nacieron gran parte de las estrellas y se formaron los cúmulos globulares con la población de estrellas más viejas que ahora pueblan el halo galáctico; la segunda etapa fue más lenta, con la adición progresiva de otras galaxias enanas que fueron absorbidas por la nuestra. No obstante, la Vía Láctea es una galaxia atípica por el hecho de no haber sufrido ninguna fusión importante con otra en los últimos diez mil millones de años. Ha formado estrellas de manera constante y ha tenido una evolución relativamente tranquila, a diferencia de lo que ha sucedido con otras galaxias espirales. Nuestro sistema solar se ubica cerca del extremo de uno de los brazos de la galaxia. Vivimos en un planeta de tamaño mediano, que orbita alrededor de una estrella mediana, en una galaxia mediana y, sin embargo —o, mejor dicho, por ello—, la humanidad ha conseguido ir conociendo el cosmos, empujando el límite de lo desconocido más y más allá. Como dijo una vez el gran astrónomo Edwin Hubble, «la astronomía es la historia de los horizontes que retroceden».



Dos vistas de la Vía Láctea y ubicación de nuestro sistema solar. Desde la Tierra vemos la galaxia «de perfil».

dría pensar que cualquier objeto situado sobre la superficie de la Tierra sentiría el movimiento de esta al girar alrededor de sí misma o del Sol. Sin embargo, en una primera aproximación, nuestro planeta se asemeja a un sistema inercial (con velocidad constante) y por eso no se notan tales efectos, aunque sí tenga consecuencias, por ejemplo, en la circulación atmosférica de los vientos y borrascas. El heliocentrismo también chocaba frontalmente con las doctrinas filosóficas clásicas emanadas de la teoría aristotélica sobre el movimiento natural, según las cuales la Tierra ocupaba un lugar privilegiado en el cosmos. Es un ejemplo de la interrelación entre la observación astronómica y la incorrecta interpretación, en este caso, de los fenómenos naturales en la Tierra.

En consecuencia, el modelo geocéntrico, impulsado por Ptolomeo y enraizado posteriormente en las creencias religiosas, perduró como doctrina oficial hasta el fin de la Edad Media. El heliocentrismo y el fin del dogma aristotélico acabaron imponiéndose finalmente gracias a las observaciones de Galileo, a quien se considera fundador del método experimental en la ciencia moderna.

Paradoja de la noche oscura

Aun sin contar con instrumentos de observación, se pueden obtener sorprendentes conclusiones a partir de la contemplación del firmamento. Así, el astrónomo alemán Heinrich Olbers planteó en 1823 una interesante paradoja al preguntarse por qué la noche es oscura, una cuestión que ya había abordado Johannes Kepler en 1610. Parece una pregunta inocente pero, en realidad, contiene profundas sutilezas acerca del tamaño del universo.

En un universo estático y eterno, espacialmente infinito y homogéneo, la noche no podría ser oscura, sino que la esfera celeste debería aparecer totalmente iluminada. En efecto, bajo tales supuestos, cualquier dirección hacia la que el ojo de un observador dirigiera su mirada debería, tarde o temprano, encontrarse con una estrella brillante. Por ello, hay que prescindir de alguna de las hipótesis de partida: un universo homogéneo no puede ser espacial y temporalmente infinito.

Ahora bien, si el universo solo existe desde hace un tiempo finito, como implica la teoría del Big Bang, y se tiene en cuenta la finitud de la velocidad de la luz, solo podremos ver estrellas situadas a una cierta distancia de nosotros, lo cual constituye una región ciertamente inmensa del universo, pero finita. Por ello, cuando nos referimos al universo observable, y suponiendo que sea homogéneo e isótropo, con igual composición y propiedades en todas sus direcciones, estamos considerando una región esférica del espacio alrededor de la Tierra que puede ser observada en el momento presente. Es una limitación intrínseca de la naturaleza, y no depende de la tecnología actual o futura.

A veces se distingue entre el universo visible mediante la radiación electromagnética exclusivamente, y el universo observable propiamente dicho, en el cual se incluyen otros «mensajeros» del universo primigenio, tales como neutrinos u ondas gravitatorias. El universo visible se extiende hasta la distancia en la que los fotones se desacoplaron de la materia y el universo se volvió transparente a la luz, unos 380 000 años después del Big Bang, y se corresponde con un radio actual de unos 45 000 millones de años-luz. El límite del universo observable se extiende un poco más, hasta 46 000 millones de años-luz. Observemos que tales radios son muy superiores a 18 000 millones de años-luz, resultado de multiplicar la velocidad de la luz por la edad del universo, debido a la expansión del espacio, que incrementa su valor considerablemente. Habría, pues, enormes porciones del universo que quedan fuera de cualquier posibilidad de observación y se especula acerca de su tamaño real, que según algunas estimaciones podría ser 10^{23} veces el universo observable o incluso más!

Sin embargo, cabría otra posibilidad que recuerda a la ciencia ficción: el universo podría ser menor que el universo observable. Si fuera finito pero ilimitado (cerrado) y de gran curvatura, se estaría inadvertidamente tomando por galaxias lejanas lo que en realidad serían imágenes duplicadas de galaxias más próximas, en el caso de que la luz hubiera «circunnavegado» el universo. Conviene advertir que no resulta fácil refutar experimentalmente esta teoría desde ese punto de vista, puesto que las imágenes duplicadas de una misma galaxia datarían de muy distintas épocas

y, por tanto, tendrían aspectos muy diferentes. No obstante, todas las evidencias observacionales apuntan hacia un universo plano, por lo que la anterior posibilidad queda descartada en la práctica.

EL UNIVERSO EN EXPANSIÓN

Albert Einstein propuso la teoría de la relatividad general en 1915 como generalización de su teoría especial o restringida a sistemas de referencia inerciales, es decir, dotados de velocidad constante y sin aceleración, donde el espacio-tiempo juega un papel dinámico en sus ecuaciones e incluye la gravitación. Ciertas soluciones permitían describir un universo en expansión, donde el propio espacio crece con el transcurso del tiempo. El concepto se puede visualizar con la imagen de un globo que se hincha, pero es una analogía que hay que interpretar con cuidado.

Cuando Einstein publicó su teoría de la relatividad general, el paradigma científico imperante sostenía que el universo era estático y eterno. Sin embargo, las soluciones estáticas de su teoría eran inestables debido a la atracción gravitatoria global, que conducía irremediablemente a un colapso generalizado. Así pues, en 1917 Einstein se vio forzado a considerar una fuerza repulsiva, una especie de antigravedad, que compensara la tendencia natural a colapsar. Para ello introdujo en las ecuaciones de su teoría general la llamada *constante cosmológica*, que se designa usualmente mediante la letra griega Λ . Postular la constante cosmológica es equivalente a suponer que el universo está permeado por una densidad constante de energía de origen no gravitatorio con el fin de equilibrar, aunque precariamente, la tendencia a colapsar de un universo estático.

Aunque ahora resulte sorprendente, en la década de 1920 aún se debatía si el universo estaba constituido por una única galaxia, la Vía Láctea, que era la postura ortodoxa, o si había estrellas fuera de ella. El astrónomo estadounidense Edwin Hubble demostró que nuestra galaxia no era la única, sino que se encontraba separada de otras por inmensos espacios vacíos. Para ello tuvo que encontrar un método fiable para medir distancias entre objetos celestes.

Cefeidas: una regla para medir el universo

Es fácil dudar, al observar una luz en la noche sin más referencias, si se trata de un objeto muy brillante lejano o de un objeto menos brillante pero cercano. Es un problema habitual para los conductores, por ejemplo. Algo semejante les ocurre a los astrónomos con las medidas de luminosidad y distancia de los objetos celestes. Sin embargo, Hubble utilizó un ingenioso método para averiguarlo.

Las cefeidas son estrellas variables cuyo brillo oscila con periodos regulares comprendidos entre días y meses. Cuanto más largo es el periodo, mayor es la luminosidad de la estrella, como había demostrado la astrónoma Henrietta Leavitt a principios del siglo xx. Midiendo el periodo de una cefeida puede determinarse su luminosidad. Comparándola entonces con su brillo aparente, el cual decrece con el inverso del cuadrado de la distancia, obtendremos una medida de la separación de la estrella con respecto a la Tierra. Las cefeidas actúan, pues, como «balizas» de posición que señalan las distancias a las que se encuentran. Además, son estrellas brillantes, lo que permite su observación más allá de la Vía Láctea.

Por otro lado, las galaxias que observamos se están alejando de la Tierra en todas direcciones, como se deduce a partir del desplazamiento hacia el rojo de la luz que recibimos de ellas. Este suele explicarse mediante el *efecto Doppler*, que consiste en el cambio aparente de la frecuencia de una onda cuando la fuente emisora o el observador se desplazan (figura 1). El efecto Doppler es bien conocido en física y en muchas aplicaciones tecnológicas actuales, como en el diagnóstico médico mediante ondas acústicas. Gracias a este efecto se sabe, por ejemplo, que Andrómeda se está acercando con una velocidad de unos 300 km/s a la Vía Láctea, con la que se fusionará dentro de unos cinco mil millones de años, formando una nueva galaxia bautizada ya como Lactómeda (*Milkomeda* en inglés).

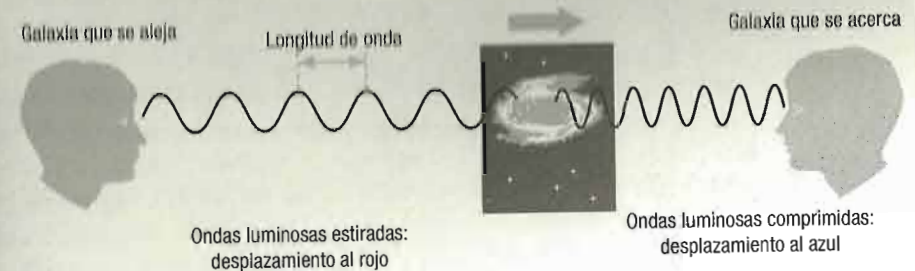
Sin embargo, en el caso de objetos celestes distantes hay otra razón de mayor importancia por la que se produce el desplazamiento hacia el rojo. Las galaxias no están alejándose

unas de otras a causa de una velocidad propia, sino porque en un universo en expansión el propio espacio entre observador y objeto observado crece literalmente. Este fenómeno se conoce como *desplazamiento hacia el rojo cosmológico*. Para ilustrarlo, suele utilizarse la citada imagen de un globo que se hincha, en el cual están dibujadas unas galaxias como manchas que se separan unas de otras sin que haya un punto único o especial alrededor del cual tenga lugar la expansión (figura 2). En esta imagen, el globo aumenta, pero el tamaño de las galaxias no cambia con la expansión, y esto no se debe a un despiste del dibujante. Los cuerpos ligados, como las galaxias, los planetas, los cristales, las moléculas o los mismos átomos no se expanden, pues las fuerzas atractivas superan de sobra la débil antigravedad. En cambio, la separación entre crestas y valles de las ondas electromagnéticas sí que varía, como muestra el esquema inferior de la figura 2, conduciendo al desplazamiento hacia el rojo cosmológico. En realidad, es todo el espectro de frecuencias el que se desplaza hacia valores menores.

Comparando las distancias a las galaxias con sus respectivos desplazamientos al rojo debidos a la recesión o alejamiento relativo entre ellas, Hubble encontró una relación lineal entre ambas magnitudes, siendo el coeficiente de proporcionalidad la llamada constante de Hubble. La conclusión más plausible era, y es, que el universo estaba en expansión tras el instante inicial creador, desechando para siempre la imagen de un universo eterno y estático. El Big Bang fue una idea revolucionaria que cambió la visión del mundo, y sus consecuencias sociales y científicas quizá pueden compararse con las que tuvo la teoría de la evolución de las especies por selección natural de Charles Darwin.

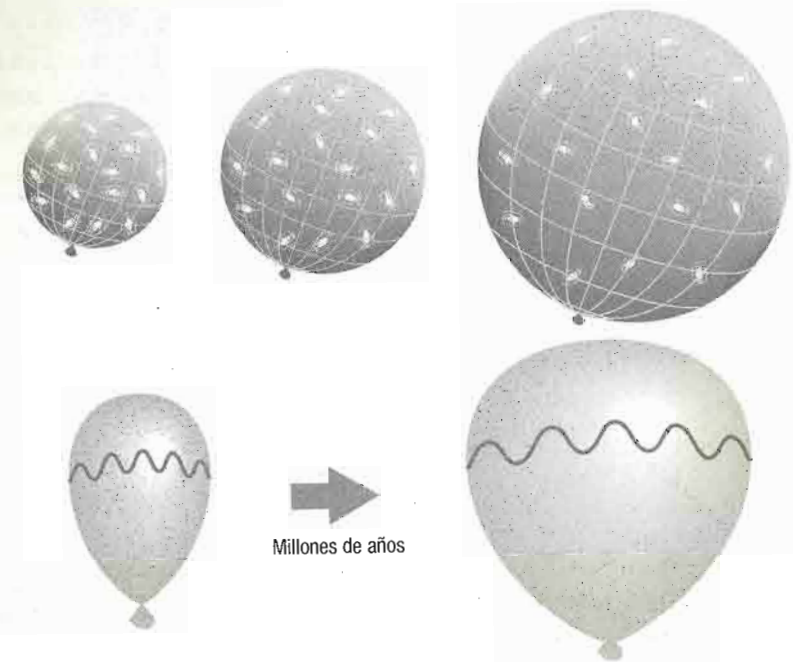
Hay que aclarar que las cefeidas, habiendo jugado un papel decisivo para descubrir la expansión del universo, no representan el único indicador de distancias cosmológicas. Existen métodos alternativos, entre los que destaca el basado en las supernovas de tipo Ia, que reproducen un patrón común al explotar. Este tipo de supernovas tiene su origen en un sistema binario formado por una enana blanca —una estrella como el Sol que murió arrojando al espacio toda su atmósfera— y otra estrella cuya materia

FIG. 1



La radiación emitida por un cuerpo celeste que se aleja del observador aumenta su longitud de onda (reduce su frecuencia). Lo contrario ocurre con los cuerpos luminosos que se acercan: las ondas reducen su longitud de onda y aumentan su frecuencia.

FIG. 2



Arriba, símil de la expansión del universo como un globo que se hincha. Obsérvese que el tamaño de las galaxias no cambia con la expansión. Debajo, la misma imagen representa el aumento de la distancia entre valles o crestas de las ondas luminosas, que da lugar a longitudes de onda mayores y frecuencias menores (desplazamiento hacia el rojo).

LA LEY DE HUBBLE

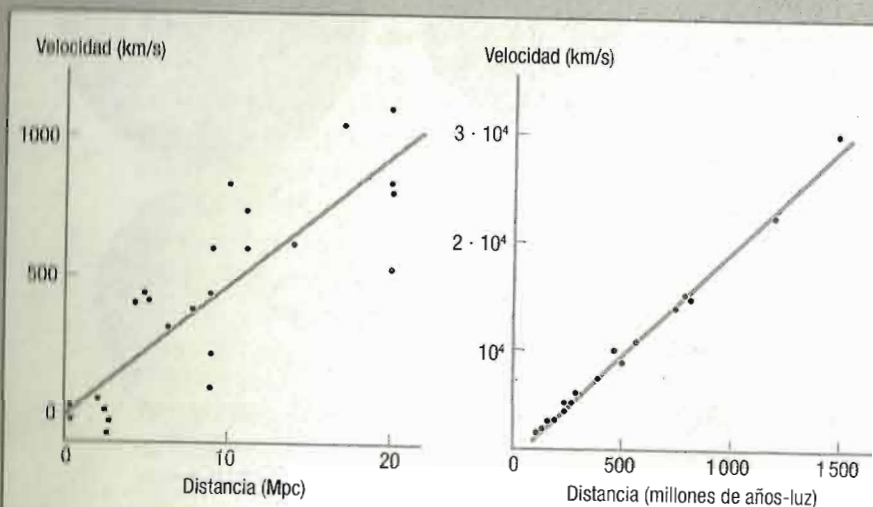
La ley de Hubble establece que las galaxias se alejan unas de otras a una velocidad proporcional a su distancia. Esta ley conduce al modelo del universo en expansión y, retrocediendo en el tiempo, a la hipótesis del Big Bang. La ley puede escribirse como:

$$v = H_0 D,$$

siendo v la velocidad de recesión o alejamiento relativo entre galaxias debida a la expansión del universo (medida generalmente en km/s); D la distancia actual a la galaxia (en Mpc), y H_0 la constante de Hubble, que toma un valor aproximado de 70 km/s/Mpc.

La constante de Hubble

Cabe señalar que la famosa «constante» de Hubble no es realmente constante. Cuando el universo era mucho más joven, el ritmo de expansión y, en consecuencia, la constante de Hubble era mayor que en la actualidad. En realidad, sería más apropiado referirse al «parámetro de Hubble». La relación lineal de la ley de Hubble entre la distancia y el desplazamiento al rojo cosmológico supone que el ritmo de expansión del universo ha sido constante. Sin embargo, para galaxias más distantes, cuya luz ha estado viajando durante mucho más tiempo, la aproximación del ritmo de expansión deja de ser válida.



A la izquierda, velocidad de recesión de las galaxias en kilómetros por segundo frente a la distancia expresada en megapársecs. Son datos originales de Hubble de galaxias no muy lejanas y con gran dispersión. A la derecha, la misma gráfica pero con datos posteriores y la distancia expresada en años-luz.

está siendo absorbida por la primera mientras gira en órbita una alrededor de la otra. El brillo máximo, que puede alcanzar por unos breves instantes la intensidad de toda una galaxia, ocurre cuando la enana blanca acaba por superar el límite de estabilidad, denominado *límite de Chandrasekhar*, y explota. Gracias a los valores estables de la luminosidad de las supernovas de tipo Ia, se las considera las nuevas balizas, o *candelas estándar*, que han permitido descubrir que el universo se expande a ritmo acelerado. Este hallazgo, totalmente inesperado en su momento, ha obligado a reintroducir la constante cosmológica y a incorporar la noción de *energía oscura*, una antigravedad de origen desconocido que constituye un componente esencial en el universo, como veremos más adelante.

Aunque Einstein había introducido —con cierto desagrado— la constante cosmológica en su teoría para conseguir un universo estático, fue reacio a aceptar la solución de un universo en expansión, incluso tras las pruebas obtenidas por Hubble. Solo tras su viaje a Estados Unidos, en 1931, donde visitó el Observatorio de Mount Wilson, en el que trabajaba Hubble, y después de discutir con otros científicos, se convenció de la expansión del universo y de que la constante cosmológica era innecesaria, calificándola entonces como el mayor error de su vida. Y sin embargo, muchos años más tarde, la constante cosmológica se ha vuelto a introducir, con un valor pequeño pero no nulo, para explicar la expansión acelerada del universo.

El universo en estado estacionario

Una vez descartado un universo estático y eterno, todavía cabía la posibilidad de un universo en expansión pero permaneciendo en un estado estacionario, inmutable y eterno a la vez, evitando la hipótesis de una gran explosión creadora. James Jeans fue el primer científico en conjeturar la cosmología del estado estacionario del universo, en la década de 1920, hipótesis que fue retomada en los años cincuenta por Fred Hoyle, que intentó hacerla compatible con las pruebas de la expansión halladas por Hub-

ble. Según esta teoría, el universo debe presentar en promedio el mismo aspecto para cualquier observador en cualquier punto del espacio y en cualquier instante del tiempo, lo que se denomina *principio cosmológico perfecto*.

Pero ¿cómo conciliar la invariabilidad del universo con la expansión? Hoyle supuso que la materia se creaba continuamente a un ritmo capaz de compensar el vacío creado por la expansión, manteniendo una densidad media constante. Este requisito exige una tasa de generación de materia de la nada de apenas un átomo por kilómetro cúbico al año, muy por debajo de la comprobación experimental de la conservación de la energía, incluso hoy en día. El modelo exige el sacrificio de uno de los grandes principios de la física, pero ante ello cabría argumentar que una mayor violación tiene lugar en el Big Bang, cuando todo el universo surge aparentemente de la nada.

Durante años, la comunidad científica permaneció dividida entre partidarios del universo estacionario, liderados por Hoyle, y partidarios del Big Bang, aunque la mayoría se fue decantando gradualmente por este último. El descubrimiento del fondo cósmico de microondas fue decisivo para que la Gran Explosión se convirtiera en el nuevo paradigma en astronomía y astrofísica, y se abandonase definitivamente la cosmología del estado estacionario.

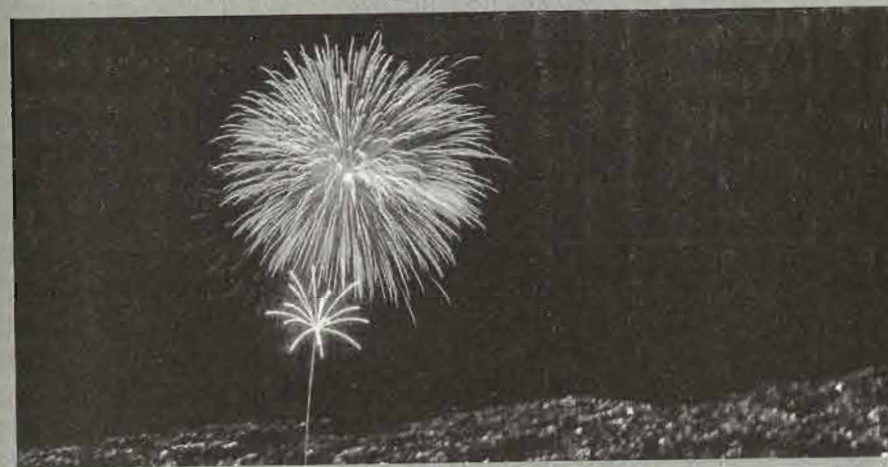
FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS E INFLACIÓN

En 1965, los físicos Arno Penzias y Robert Wilson (en la fotografía superior de la página 37) estaban trabajando para los Laboratorios Bell, en Estados Unidos, sobre un nuevo tipo de antena de microondas extremadamente sensible para la comunicación con satélites, cuando encontraron un ruido de fondo cuyo origen, en principio, atribuyeron a la atmósfera o incluso a excrementos de palomas. Esta hipótesis fue descartada, pues después de limpiar cuidadosamente la antena y de verificar el buen funcionamiento de todos los circuitos y componentes, se comprobó que la intensidad de la radiación era la misma independientemente de la dirección de la antena, fuera de día o de noche y a lo largo de todo

LOS ERRORES MÁS COMUNES ACERCA DE LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

La expansión del universo es un hecho aceptado por la comunidad científica y conocido por el público en general. Sin embargo, siguen existiendo ideas erróneas en torno a él.

1. El radio del universo observable puede estimarse utilizando la conocida fórmula de espacio igual a velocidad (de la luz) por tiempo (edad del universo), es decir, unos 18 000 millones de años-luz.
Falso: el cálculo sería correcto si el universo no estuviera expandiéndose. A la distancia recorrida por la luz hay que sumarle la expansión del propio espacio.
2. El desplazamiento hacia el rojo de la luz procedente de galaxias muy lejanas que se alejan de nosotros se debe solo al efecto Doppler.
Falso: el efecto Doppler domina solo para galaxias cercanas. Para galaxias lejanas, el desplazamiento hacia el rojo se debe principalmente a la expansión del propio espacio.
3. Todos los elementos químicos que existen en la naturaleza se formaron en el universo cuando este tenía solo tres minutos de vida, durante la nucleosíntesis primordial.
Falso: durante la nucleosíntesis primordial se formaron solo los elementos ligeros, como el hidrógeno y el helio. El carbono y el oxígeno se forman en estrellas del tamaño del Sol o mayores, mientras que el plomo y el oro se sintetizan en estrellas más pesadas y se liberan al espacio durante la explosión de las supernovas.
4. Las galaxias no se pueden alejar unas de otras a velocidades superiores a la de la luz.
Falso: en un universo en expansión, la velocidad de recesión de las galaxias crece con la distancia. Más allá de una cierta distancia, excede la velocidad de la luz. Esto no viola la relatividad, puesto que tal velocidad se debe a la expansión del propio espacio.



El Big Bang no fue como la explosión de una carcasa en los fuegos de artificio, cuyos fragmentos se extienden por el espacio ya existente. En realidad, el espacio mismo se crea con la explosión.

el año. Esto demostró que la señal detectada era de origen extraterrestre, situada fuera del sistema solar, e incluso procedente de más allá de nuestra galaxia. En un primer momento se comprobó que la radiación detectada era isotrópica, es decir, que mostraba la misma intensidad desde cualquier dirección.

Otros dos físicos estadounidenses, Bob Dicke y Jim Peebles, no tardaron en relacionar la radiación de fondo descubierta por Penzias y Wilson con el «resplandor» que cabía esperar en un universo en expansión generado por una gran explosión, como el propuesto por Alexander Friedman y Georges Lemaître tras resolver las ecuaciones de la relatividad general de Einstein, que proporcionaban soluciones tanto de expansión como de contracción. Una explicación alternativa para la radiación del fondo cósmico de microondas en el modelo estacionario del universo resultaba totalmente artificial e inverosímil.

Tras la primera fase del Big Bang, y gracias a la inimaginable fuente de energía suministrada por la inflación, emergieron la materia y la radiación en un proceso denominado *recalentamiento*, poblando el universo primitivo con un plasma extremadamente caliente. En realidad, materia y antimateria aparecieron en casi igual proporción, pero con un ligero exceso de la primera, cuya razón profunda aún se desconoce. Electrones y positrones (también llamados antielectrones) se aniquilaron mutuamente emitiendo fotones, lo que dio lugar a un superávit de electrones —debido al exceso original de materia— y a un «mar» de fotones, en un universo dominado entonces por la radiación.

Así pues, el universo se asemejaba a una «sopa caliente», constituida entonces por quarks y electrones, entre otros componentes, todo bien «adobado» con fotones que eran absorbidos y reemitidos de forma casi instantánea, sin tiempo para propagarse. Semejante receta se reproduce actualmente, para ser analizada en condiciones de laboratorio, al hacer colisionar núcleos de plomo a velocidades cercanas a la de la luz en los grandes aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por *Large Hadron Collider*) del CERN, la Organización Europea para la Investigación Nuclear, en Ginebra (Suiza).

Transcurrida una milésima de segundo tras los primeros instantes del Big Bang, la temperatura del plasma descendió lo suficiente como para permitir la formación de protones y neutrones por unión de los quarks gracias a la llamada *interacción fuerte*, venciendo así la todavía extraordinaria agitación térmica.

Al cabo de unos pocos minutos, protones y neutrones se pudieron unir a su vez para constituir los núcleos atómicos, pero todavía sin electrones ligados. En ese proceso, conocido como *nucleosíntesis primordial*, además de los protones, que permanecieron desligados para generar hidrógeno más adelante, se sintetizaron núcleos de helio (formados por dos protones y dos neutrones), deuterio (un protón y un neutrón) y litio (tres protones y cuatro neutrones), estos últimos en mucha menor cantidad. Las proporciones relativas de todos ellos están en buen acuerdo con los porcentajes observados en el universo dentro de los márgenes de indeterminación o error experimental, excepto para el litio, del que se constata algo menos de lo esperado. Este acuerdo se considera un gran éxito y constituye uno de los pilares que sustentan la hipótesis del Big Bang.

Por otro lado, y teniendo en cuenta la necesidad de la materia oscura como una componente esencial del universo para explicar sus estructuras y dinámica, cabría pensar que esta pudiera corresponder a algún tipo de materia ordinaria que haya pasado inadvertida a la observación astronómica, como por ejemplo los MACHO (acrónimo del inglés *MAssive Compact Halo Objects*, «objetos astrofísicos masivos de halo compacto»). Estos objetos engloban cuerpos celestes rocosos, estrellas enanas, marrones y de neutrones, agujeros negros... Sin embargo, bajo tal supuesto, los cálculos de las abundancias relativas de los elementos ligeros obtenidos mediante simulaciones en potentes ordenadores discreparían con las observaciones. Además, si los MACHO tuvieran que dar cuenta de toda la materia oscura, entonces nuestro universo a gran escala sería muy diferente al que realmente se observa.

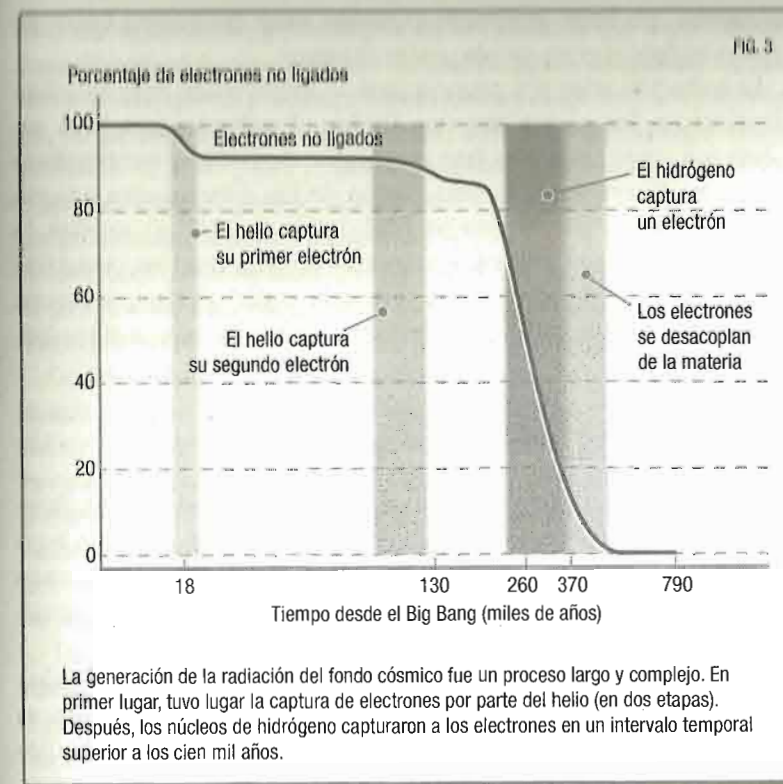
Pero ahora volvamos a la intensa radiación electromagnética, que continuaba sin poder propagarse libremente por el espacio porque las cargas eléctricas positivas (núcleos) y negativas (electrones) seguían separadas en el plasma. Hubo que esperar

380 000 años aproximadamente desde el Big Bang para que núcleos y electrones se unieran dando lugar a los átomos neutros, principalmente hidrógeno y helio, en lo que se conoce como *recombinación*, nombre no del todo apropiado, pues era la primera vez que se combinaban.

Una vez que los fotones se desacoplaron de la materia, y teniendo en cuenta que este proceso duró varios miles de años (figura 3), estos pudieron viajar libremente a través del universo hasta nuestros días, aumentando su longitud de onda y constituyendo lo que actualmente se conoce como radiación del fondo cósmico de microondas y que Penzias y Wilson detectaron como ruido de fondo.

Cada fotón que nos alcanza procede de un determinado punto de aquel universo primitivo, que llega a nosotros desde una dirección de la bóveda celeste, como se muestra en el mapa obtenido por el satélite WMAP de la NASA (véase la figura 4, en la página 42), y más recientemente por el satélite Planck de la Agencia Espacial Europea (ESA). El espectro de frecuencias del fondo cósmico de microondas actual se corresponde con la radiación de un cuerpo negro casi perfecto a una temperatura promedio de 2,73 K, es decir, unos -270°C . Conviene distinguir entre los conceptos de cuerpo negro y agujero negro: ambos absorben todo tipo de radiación, de cualquier frecuencia, que incide sobre ellos. Sin embargo, un cuerpo negro, además, emite luz en virtud de su temperatura.

Volviendo al fondo cósmico de microondas, hay fluctuaciones en su temperatura según las distintas direcciones de observación, llamadas *anisotropías* o *heterogeneidades*, que suponen variaciones del orden de una cienmilésima de grado. Sin duda, son fluctuaciones que, dada su escasa magnitud, corroboran el principio cosmológico de homogeneidad e isotropía del universo a grandes escalas, pero que tienen una importantísima consecuencia en la evolución del universo. El mapa de temperaturas del fondo cósmico de microondas representa también una distribución de densidades del universo primitivo, de la época en que se produjo la recombinación. De ahí que el estudio de esta radiación permita comprender cómo aquel universo se ha transformado en el actual, y concluir que la presente distribución de galaxias, en forma de cúmulos y supercúmulos, vacíos y demás estructuras, es el resul-



tado de variaciones infinitesimales de origen cuántico en la distribución de la materia en una época muy temprana del universo.

Pese a su atractivo intelectual, su fundamentación dentro de la relatividad general y la concordancia con las observaciones, la hipótesis del Big Bang presentaba una grave dificultad conceptual para explicar la homogeneidad e isotropía del universo a gran escala. En efecto, al crecer el universo al ritmo promediado a lo largo de su edad, han de surgir regiones muy separadas espacialmente, causalmente desconectadas debido a la finitud de la velocidad de la luz y que, por tanto, no pueden haberse equilibrado térmicamente y, por ende, homogeneizado. Resulta en verdad sorprendente que un universo evolucionando siempre al mismo ritmo, sin haber alcanzado un equilibrio global en ningún

momento, no haya generado regiones muy diferentes entre sí, observándolo a gran escala, naturalmente.

La inflación cósmica proporciona la explicación más sencilla: al principio, las partes que constituían el universo primitivo estaban tan cerca unas de otras que tenían densidad y temperatura comunes. El crecimiento vertiginoso de las dimensiones en una fracción minúscula de tiempo (del orden de 10^{-33} s) explica la uniformidad actual, pues al expandirse se diluyeron las pequeñas diferencias iniciales desde una perspectiva global, aunque fueran las semillas de las actuales estructuras, como galaxias y cúmulos.

Un universo (casi) plano

La inflación también aporta una explicación natural a otro hallazgo sorprendente acerca de la curvatura del universo actual. A gran escala, el universo aparece globalmente casi plano, con curvatura casi cero, aunque localmente no sea así, en especial en las proximidades de cuerpos muy masivos como los agujeros negros.

Si no hubiese sido por la inflación, las condiciones iniciales del universo habrían tenido que estar ajustadas con muchísimas cifras decimales para que, con la evolución a lo largo de millones de años, el universo resultara casi plano en estos momentos. Esto significa que un universo tan plano como el observado ahora es extremadamente improbable. En cambio, al incluir la inflación en el modelo cosmológico, resulta natural, es decir, bastante probable, llegar al universo plano actual, independientemente de la curvatura que tenía en los primeros instantes del Big Bang. No es necesario el ajuste fino al que la física se enfrenta a menudo para explicar la naturaleza.

PRIMERA GENERACIÓN DE ESTRELLAS, CUÁSARES Y AGUJEROS NEGROS

Una vez transcurrida la segunda fase del universo primigenio, que según nuestra clasificación abarca desde la inflación hasta

el desacoplamiento y liberación de los fotones que actualmente constituyen el fondo cósmico de microondas, entramos en una tercera fase que se prolonga hasta nuestro días. No es, desde luego, un periodo ni corto ni uniforme, pues ha durado unos 13 800 millones de años (Ma) y ha contemplado la creación de estructuras ordenadas que se han ido descubriendo a medida que se perfeccionaba la instrumentación.

Es importante señalar que la aparición de estructuras según el modelo del Big Bang tiene lugar jerárquicamente, es decir, las estructuras pequeñas se forman antes que las grandes.

Los astrofísicos suelen distinguir una primera edad oscura en la que todavía no se habían formado estrellas que pudieran iluminar el espacio en expansión del universo. En aquella remota época, la única radiación emitida era la correspondiente al hidrógeno neutro. Actualmente se realiza un gran esfuerzo observacional para detectar esa tenue radiación, que podría constituir una herramienta tan potente como el propio fondo de radiación de microondas para estudiar el universo primigenio.

Tuvieron que transcurrir varios cientos de millones de años hasta que aquellas fluctuaciones de densidad detectadas en el fondo cósmico de microondas evolucionaron gradualmente hacia aglomeraciones de materia por efecto de la gravedad. Las regiones más densas adoptaron una forma reticular de filamentos, de cuyos nodos surgieron los primeros «viveros» de estrellas. Se trataba de pequeñas protogalaxias, que a su vez se unieron entre sí para formar las galaxias de primera generación. En aquellas galaxias primitivas la materia ordinaria permanecía mezclada con la materia oscura, mientras que en las galaxias actuales la materia ordinaria se concentra en las regiones internas y la materia oscura se encuentra dispersa en un gran halo exterior.

La primera generación de estrellas surgió en esas galaxias primitivas, constituidas casi exclusivamente por hidrógeno y helio, procedentes de la nucleosíntesis primordial. Esas primeras estrellas, de entre cien y mil masas solares, superficie muy caliente y vida breve, fabricaron elementos pesados, que fueron esparcidos por el espacio circundante al explotar las estrellas como supernovas al final de su vida. A partir de esos *metales*, como se de-

Somos polvo de estrellas.

CARL SAGAN

nomina en astrofísica a cualquier elemento que no sea hidrógeno o helio, se formó, por ejemplo, nuestro planeta y, millones de años después, aparecieron los seres vivos. El hierro de la hemoglobina que transporta nuestra sangre o el oxígeno que constituye la molécula de agua junto con hidrógeno primordial proceden de la nucleosíntesis estelar. Sin embargo, observar estrellas de la primera generación resulta harto difícil por haber tenido una vida extremadamente breve en términos cosmológicos y brillar en una época en la que, de nuevo, el universo era en gran parte opaco a su luz.

Esa nueva opacidad del universo a la luz, tras la recombinación que dio lugar al fondo cósmico de microondas, se debió a la acción sobre el gas intergaláctico de la radiación ionizante procedente de la primera generación de galaxias, y de otros extraordinarios objetos celestes: los *cuásares*. Los primeros cuásares (acrónimo de «fuente de radio cuasiestelar») se descubrieron a partir de la década de 1950 y desde entonces se conocen más de cien mil, todos muy distantes: el más cercano, a 240 Mpc (megapársecs), que equivalen a unos 780 millones de años-luz, y el más lejano a 6 Gpc (gigapársecs), que equivalen a unos 20000 millones de años-luz. La mayoría de los cuásares se sitúan a más de 1 Gpc de distancia y por tanto proporcionan valiosísima información acerca del universo de hace miles de millones de años. Con la luz procedente de un cuásar situado a ocho mil millones de años-luz de la Tierra se ha podido comprobar de forma espectacular el efecto de lente gravitatoria predicho por la teoría de la relatividad de Einstein. Este fenómeno consiste en la desviación de la luz cuando se aproxima a un cuerpo muy masivo, debido a la curvatura que produce la gravedad de este en el espacio-tiempo. El análisis de esa desviación permite obtener datos sobre la masa y otras características del cuerpo que actúa como lente.

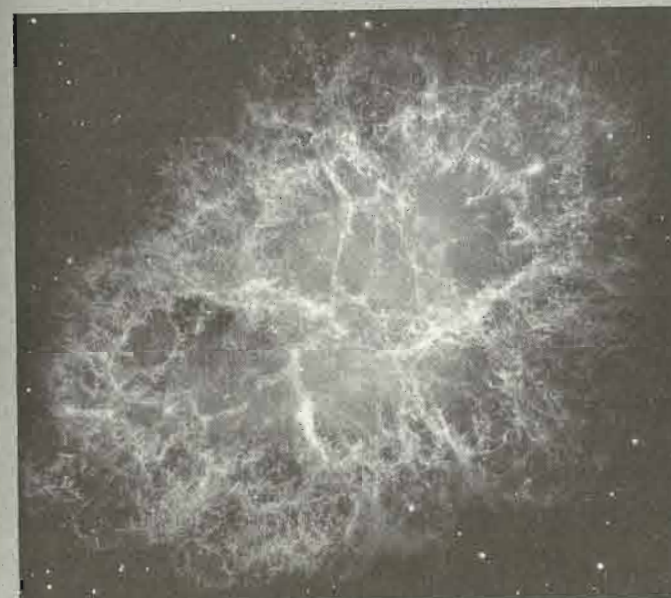
Los cuásares se caracterizan por una emisión de ondas de radio, luz visible, ultravioleta, rayos X y gamma tan colosal, que hacen palidecer a otros fenómenos astrofísicos, exceptuando a supernovas y erupciones de rayos gamma. Los cuásares pueden fácilmente liberar una energía equivalente a cientos de galaxias medianas

ORIGEN CÓSMICO DEL AGUA: UN FELIZ ENCUENTRO

La molécula de agua, la célebre H_2O , está constituida por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, unidos por un enlace covalente con carácter polar que le confiere sus propiedades características. Los protones emergieron en la nucleosíntesis primordial, minutos después del Big Bang, y unos 380000 años más tarde capturaron electrones y se convirtieron en átomos neutros de hidrógeno. Los primeros núcleos de oxígeno surgieron unos mil millones de años más tarde, a partir de reacciones de fusión nuclear en el seno de la primera generación de estrellas muy masivas. Cuando estas llegaron al final de su vida y estallaron, dispersaron elementos químicos que se mezclaron con el gas ya existente. Al encontrarse los átomos de hidrógeno y de oxígeno en presencia de polvo interestelar pudieron unirse para formar la molécula de agua, que quedaría «flotando» en el espacio.

¿Cómo llegó el agua a la Tierra?

La explicación más simple supone que el agua formó parte de la prototierra a partir del gas que rodeaba al Sol al formarse el sistema solar. Sin embargo, las altas temperaturas de la Tierra primitiva probablemente hicieron que el vapor de agua se perdiera en el espacio. Por eso se cree que el agua llegó principalmente mediante el impacto de cometas procedentes de los confines del sistema solar, con un alto contenido en hielo. No obstante, hay detractores de esa teoría, pues el contenido en deuterio (un isótopo escaso del hidrógeno) en el agua en los actuales cometas es mucho más alta que la del agua de los océanos de la Tierra.



Supernova en la constelación del Cangrejo, que estalló en el año 1054; la foto es reciente por lo que se puede apreciar la onda expansiva que transporta metales al espacio.

como la Vía Láctea juntas. Actualmente se supone que los cuásares fueron «alimentados» por la acreción de materia de agujeros negros supermasivos en el núcleo de las galaxias primitivas.

Agujeros negros supermasivos

Los agujeros negros constituyen una de las formaciones celestes más fascinantes del universo y que más ha avivado la imaginación popular. Fue el matemático y astrónomo francés Pierre-Simon Laplace uno de los primeros en concebir, a finales del siglo XVIII, un objeto tan extraordinariamente masivo que su fuerza de gravedad impediría que cualquier cuerpo pudiera escapar de él, incluida la luz. De ahí el nombre de agujero negro, acuñado por el astrofísico estadounidense John Archibald Wheeler muchos años más tarde, en 1967.

Los agujeros negros supermasivos, que pueden llegar a tener miles de millones de masas solares, se sitúan en casi todas las galaxias de gran tamaño, incluida la nuestra. Según la teoría tradicional, la formación de agujeros negros se atribuye al colapso de grandes estrellas. Seguidamente, tales agujeros negros aún «infantes», con entre tres y cien veces la masa del Sol, crecen engullendo más y más materia, como otras estrellas o gas a su alrededor, incluso fusionándose con otros, hasta convertirse en gigantescos agujeros negros (véase la fotografía inferior de la página contigua). Según los modelos teóricos, este proceso debería durar miles de millones de años, y sin embargo se han encontrado evidencias de agujeros negros supermasivos pocos cientos de millones de años después del Big Bang. ¿Cómo pudieron formarse esos «titanes» con tal rapidez? Esta es una de las grandes preguntas todavía pendientes en astrofísica.

Quizá las semillas de los agujeros negros supermasivos se originasen a partir del colapso de nubes gigantes de gas primordial, sin una fase estelar intermedia. Para resolver la cuestión, astrónomos y astrofísicos no cesan en la búsqueda de agujeros negros de tamaño intermedio que, tras formarse por colapso de la materia interestelar, no disponían de materia suficiente alre-



Arriba, Robert Wilson (izquierda) y Arno Penzias (derecha) posan en 1978 ante el telescopio con el que detectaron en 1965 la radiación del fondo cósmico de microondas. Debajo, recreación artística del disco de acreción de un cuásar que va cayendo dentro de un agujero negro supermasivo y emite chorros de materia y radiación de extraordinaria energía.

dedor como para convertirse en supermasivos. La abundancia de este tipo de agujeros negros en el universo es clave para conocer el origen de los agujeros negros supermasivos.

Nuevas generaciones de estrellas y planetas

Tras la primera familia de estrellas se fueron sucediendo nuevas generaciones que incorporaron los elementos más pesados diseminados en el medio interestelar por las explosiones de supernovas. Aquellas estrellas que contienen cantidades sig-

nificativas (entre el 2% y el 4%) de metales pertenecen a la denominada *población I estelar*, formada por las estrellas más jóvenes, como nuestro Sol, que tiene una edad de 4650 Ma. Las estrellas más viejas y pobres en metales pertenecen a la *población II*, mientras que las estrellas de la

Existen innumerables soles;
existen infinitas tierras que giran
igualmente en torno a
dichos soles...

GIORDANO BRUNO

primera generación, carentes de todo metal, forman parte de la *población III*. Cabe mencionar, por el interés actual en el descubrimiento de exoplanetas, y en particular de los semejantes a la Tierra, que solo las estrellas de la población I suelen tener planetas orbitando a su alrededor.

La formación de los planetas, en especial del sistema solar, es objeto de intenso debate por los especialistas aún hoy en día, con diversas teorías en liza: la más antigua y generalmente aceptada, la hipótesis nebular, fue originariamente propuesta por Immanuel Kant en 1775 y por Pierre-Simon Laplace en 1796. A partir de una nube gigante de varios años-luz de longitud que colapsó, se formaron por condensación el Sol y los llamados *planetesimales*, agrupaciones de polvo y roca de reducidas dimensiones. La agregación de planetesimales dio lugar a los *protoplanetas*, del tamaño de la Luna o poco más, que finalmente evolucionaron hasta convertirse en los planetas rocosos actuales, como la Tierra, mientras que los planetas gaseosos procedían en buena parte del gas presente en el disco protoplanetario.

UNIDADES HABITUALES DE DISTANCIA EN ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

El Sistema Internacional de unidades utiliza el metro como patrón de longitud, lo cual resulta muy cómodo para expresar magnitudes físicas a escala humana. Sin embargo, en astronomía se precisan múltiplos del metro y unidades más grandes para expresar de manera más manejable las distancias típicas en el universo.

Unidad astronómica (UA)

Equivale aproximadamente a la distancia media entre el planeta Tierra y el Sol: 149 597 870 700 m. Resulta muy útil para medir distancias interplanetarias.

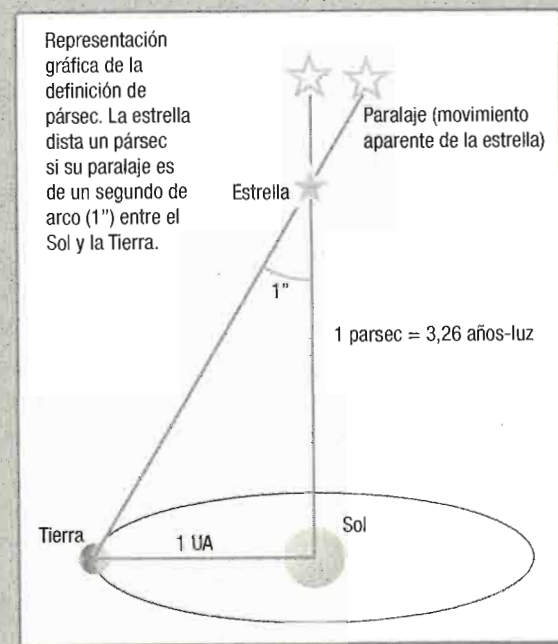
Año-luz

Equivale aproximadamente a $9,46 \cdot 10^{12}$ km, que es la distancia recorrida por la luz durante un año en el vacío. El diámetro de la Vía Láctea, por ejemplo, es de 150 000 años-luz. La distancia entre la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda es de 2,5 millones de años-luz.

Pársec (pc)

Se define como la distancia a la que una unidad astronómica subtende un ángulo de un segundo de arco (véase la figura). De la definición resulta que 1 pársec es igual a 206 265 UA. Múltiplos ampliamente utilizados del pársec son:

- El kilopársec (kpc), equivalente a mil pársecs, 3262 años-luz. La distancia entre el Sol y el centro de nuestra galaxia es igual a 8,5 kpc, cerca de 30 000 años-luz.
- El megapársec (Mpc) que son un millón de pársecs, unos 3,26 millones de años-luz. El Cúmulo de Virgo se halla situado a unos 18 Mpc de nosotros.
- El gigapársec (Gpc) que son un millón de millones de pársecs, equivale a unos 3260 millones de años-luz. El objeto más distante observado es un cuásar situado a 3,95 Gpc (12 900 millones de años-luz).



ESTRUCTURA A GRAN ESCALA DEL UNIVERSO

La materia se agrupa en galaxias como consecuencia de la fuerza atractiva de la gravedad. La Vía Láctea, por ejemplo, está constituida por centenares de miles de millones de estrellas con sus sistemas planetarios, más el gas, el polvo y la materia oscura. A su vez, las galaxias son «sociables», también debido a la gravedad, agrupándose unas con otras. La Vía Láctea no es una excepción, sino que forma parte del llamado Grupo Local, un conjunto de unas cuarenta galaxias entre las que destacan las de Andrómeda y del Triángulo, dentro de un radio de varios millones de años-luz. Simulaciones realizadas por ordenador indican que el número de galaxias satélites de la Vía Láctea debería ser mucho mayor que el observado, un problema aún sin solución que invita a una búsqueda más intensa que podría detectarlas. A su vez, el Grupo Local forma parte de un conjunto de galaxias mucho más amplio, llamado Cúmulo de Virgo. Tal estructura jerárquica se extiende por todo el cosmos proporcionando claves acerca de su futuro.

Los cúmulos de galaxias son las estructuras «ligadas» gravitacionalmente más grandes y más masivas del universo. Así, sus masas oscilan entre las 10^{12} masas solares de los cúmulos más pequeños hasta las 10^{15} masas solares de los más grandes. Su apariencia óptica viene determinada por las galaxias que albergan. Por ejemplo, el Cúmulo de Virgo contiene unas mil quinientas, entre las que se incluye la nuestra. Estas suponen una pequeña fracción (10%) de la masa total del cúmulo y presentan una extensión de unos sesenta millones de años-luz. La masa de gas caliente, hidrógeno fundamentalmente, equivale a alrededor del 20% de la totalidad del cúmulo, correspondiendo el restante 70% a la materia oscura, cuya naturaleza todavía es desconocida.

A su vez, los cúmulos también se agrupan en estructuras mayores, formando supercúmulos. Destaquemos que los supercúmulos, y otras estructuras superiores, no están ligados gravitacionalmente como podrían estarlo la Tierra y la Luna, las estrellas que giran alrededor del centro de las galaxias en espiral, o incluso las galaxias en un cúmulo. La razón de seguir hablando de

tales macroestructuras, más allá de su proximidad espacial, que podría ser casual, es que probablemente comparten un origen común. La estructura filamentosa de materia oscura distribuida por el universo concentra a la materia ordinaria, la cual, a su vez, puede brillar, dando lugar a macroestructuras observables de galaxias y estrellas en su seno.

Entre estas gigantescas estructuras hemos de destacar a Laniakea, que es un supercúmulo de unas cien mil galaxias con una longitud de unos 520 millones de años-luz y 10^{17} masas solares. Laniakea corresponde a una región que alberga cuatro grandes supercúmulos, entre los que se encuentra el de Virgo, que contiene al Grupo Local, con nuestra propia galaxia. Se trata de uno de los seis millones de supercúmulos que se calcula que pueden existir en nuestro universo observable.

DE LA GRAN MURALLA AL FINAL DE LA GRANDEZA

En 2016 se descubrió en el Instituto Astrofísico de Canarias (España) una gran megaestructura conocida como la Gran Muralla BOSS, con una longitud aproximada de unos 1400 millones de años-luz y situada a una distancia de la Tierra de entre 4500 y 6500 millones de años-luz. Son dimensiones que desbordan la capacidad humana de representarlas, siendo comparables al tamaño del propio universo observable. Además, se han descubierto otras estructuras colosales semejantes, como la Gran Muralla SLOAN. Este hecho proporciona importante información indirecta acerca de la materia oscura, que constituye una cuarta parte de la energía total del universo.

Se supone que tales estructuras a gran escala, incluyendo los supercúmulos galácticos, se formaron a lo largo de filamentos de materia oscura en forma de redes espaciales. Si la materia oscura, que surgió de la Gran Explosión y cuya verdadera naturaleza aún se desconoce, fuera relativista (materia oscura caliente) en vez de no relativista (materia oscura fría), tales estructuras hubieran sido mucho más densas y el universo muy diferente del que observamos.

Las *murallas* definen inmensos espacios vacíos donde la densidad de materia es muy baja. En 2004 se detectó una enigmática «mancha fría» en el mapa del fondo cósmico de microondas, correspondiente a una temperatura demasiado baja como para deberse a una simple fluctuación estadística. Años después, en 2015, se descubrió un *supervacío* a unos 3000 millones de años-luz (figura 4), alineado con la anterior mancha fría, lo que podría explicarla. Un supervacío es una vasta extensión de espacio yermo de materia oscura y brillante, el lugar más vacío del universo. Cuando la luz atraviesa un supervacío en expansión, pierde energía, originando ese valor tan bajo en el mapa de temperaturas del observatorio espacial WMAP.

El origen de vastas regiones tan vacías del universo se atribuye a que la materia —en especial la oscura—, acumulada en ciertas regiones debido a pequeñas fluctuaciones iniciales tras el Big Bang, ejerce una fuerza atractiva sobre su entorno acumulando más y más materia, apartándola de las regiones donde

FIG. 4



Mapa obtenido por el satélite WMAP de la NASA de la radiación del fondo cósmico de microondas. Los distintos tonos representan diferencias de temperatura respecto a la media. Aparece recuadrada un área correspondiente a un supervacío, confirmado por observaciones realizadas con telescopios ópticos.

la densidad ya era menor. De las regiones más densas nacieron los cúmulos de galaxias, mientras que las zonas menos densas dieron lugar a los vacíos cósmicos, y en ciertos casos, a esos supervacíos.

Dejando de lado estas gigantescas estructuras, una perspectiva a una escala del orden de trescientos millones de años-luz, permite descartar una estructura fractal del universo, es decir, autosemejante frente a un cambio de escala, como se había conjeturado anteriormente. Supercúmulos y filamentos aparecen distribuidos de acuerdo con el principio cosmológico de uniformidad. Es lo que se conoce como «el final de la grandeza».

HACIA UNA NUEVA ASTRONOMÍA

La existencia de ondas gravitatorias se deduce de la teoría de la relatividad general formulada por Einstein entre los años 1915 y 1916, del mismo modo que las ondas electromagnéticas son consecuencia de la teoría del electromagnetismo de Maxwell. Si estas últimas se explican por la propagación de campos eléctricos y magnéticos que transportan energía, las primeras se consideran como la propagación de perturbaciones del «tejido» espaciotemporal. Si las ondas hertzianas se originan mediante cargas eléctricas aceleradas, es decir, campos electromagnéticos variables con el tiempo, las ondas gravitatorias también serían producidas por objetos masivos sujetos a una aceleración. Podemos visualizarlas como «pliegues» o distorsiones del espacio-tiempo que se producen transversalmente a la dirección de propagación.

Einstein al principio dudaba de la existencia de las ondas gravitatorias, y supuso que, en caso de existir, serían demasiado débiles como para poder ser observadas directamente por sus efectos en un detector situado en la Tierra. Sin embargo, la tecnología ha avanzado lo suficiente hoy en día como para que tal posibilidad haya pasado de ser una quimera a una realidad esperanzadora.

Ya en 1974 los radioastrónomos Russell Hulse y Joseph Taylor descubrieron un *púlsar* binario que, de manera indirecta, permi-

INSTRUMENTOS PARA LA OBSERVACIÓN DEL CIELO

Para ver el cielo a grandes distancias se precisan instrumentos y técnicas que recojan la mayor cantidad de luz y con diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. En la nueva astronomía de multimensajeros se utilizan neutrinos e incluso ondas gravitatorias.

Telescopios ópticos (luz visible e infrarroja)

Utilizan la luz visible e infrarroja. La atmósfera supone un problema para los telescopios ópticos terrestres, pues hay efectos de turbulencia y absorción de la radiación electromagnética, además de los factores meteorológicos y la contaminación lumínica, que también les afectan. El satélite Hubble, telescopio óptico espacial de la NASA y de la Agencia Espacial Europea (ESA), ha cosechado éxitos sin precedentes en la observación del cosmos.

Telescopios de rayos X y de rayos gamma

Como la atmósfera terrestre absorbe la mayor parte de los rayos X y gamma procedentes del espacio exterior, los telescopios situados en la Tierra no pueden detectarlos y para su estudio se hace necesario un telescopio espacial. Los principales observatorios de rayos gamma actualmente operativos son los satélites INTEGRAL, de la ESA, y el Telescopio Fermi, de la NASA.

Radiotelescopios

Están compuestos por una o varias antenas parabólicas y un receptor para captar las ondas de radio. Existen radiotelescopios individuales (un solo plato) o formados por un conjunto o *array* para mejorar la resolución. Los radiotelescopios han permitido descubrir muchos tipos de objetos celestes lejanos, como los púlsares, cuásares y blázares.



Gran Telescopio Canarias, en la isla de La Palma (Canarias, España), uno de los telescopios ópticos más grandes y avanzados del mundo.

Interferometría

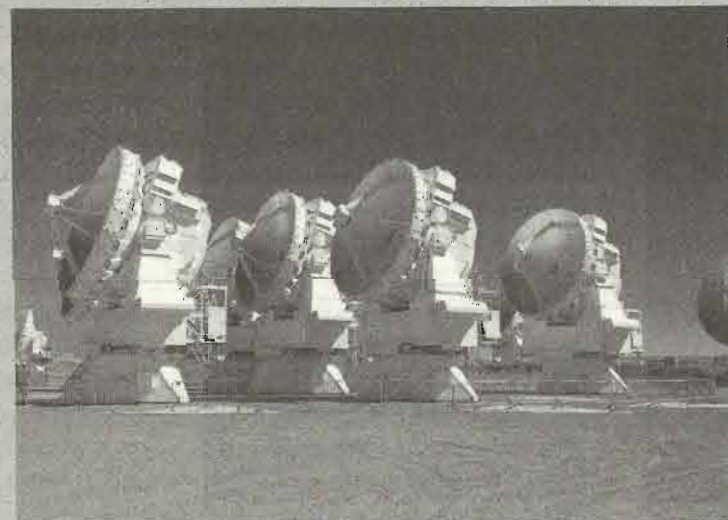
Técnica consistente en combinar diferentes telescopios y radiotelescopios con el fin de obtener una imagen de mayor resolución. Entre los observatorios radioastronómicos más conocidos se encuentran el Very Large Array (VLA), en Estados Unidos, que consta de 27 antenas, y el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), en Chile, con 66 antenas. Las instalaciones LIGO, en Estados Unidos, y Virgo, en Italia, también emplean la interferometría de haces de luz láser, en este caso para detectar ondas gravitatorias.

Espectroscopía astronómica

Técnica utilizada para averiguar diversas propiedades de estrellas y galaxias, como su composición química y su movimiento. Puesto que los elementos químicos tienen espectros de bandas característicos (como si fuera un código de barras, diferente para cada elemento), se pueden reconocer en la luz procedente de los objetos celestes.

Detectores de neutrinos

Los neutrinos son partículas sumamente elusivas que raramente interactúan con la materia. Su detección requiere grandes masas de detección, así como un sistema de amplificación muy sensible. Es preciso, además, disponer de un sistema de apantallamiento que aisle el detector del ruido de fondo. Por ello, los detectores de neutrinos se sitúan bajo tierra, bajo el agua o el hielo. Es el caso, por ejemplo, de Antares en el Mediterráneo o de IceCube en el Polo Sur.



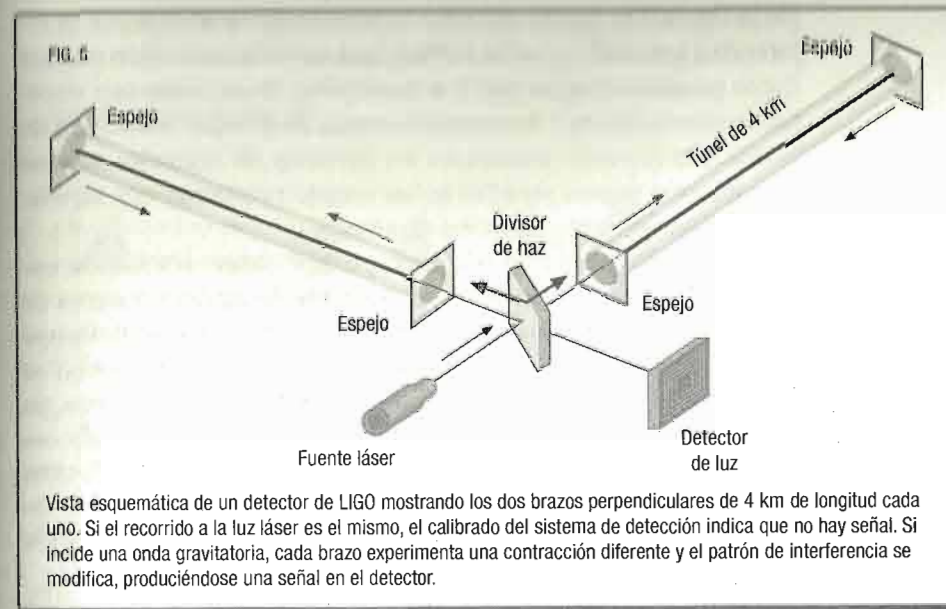
Antenas de la colaboración internacional ALMA en Chile. La instalación consta de docenas de antenas de diferentes tamaños, desde los 7 m de diámetro de las que se ven en la imagen hasta los 12 m.

tía poner a prueba las predicciones de la teoría general de la relatividad respecto a las ondas gravitatorias. Un púlsar es una estrella de neutrones, el núcleo remanente tras la explosión de una estrella lo suficientemente masiva, que gira sobre sí misma con una gran velocidad angular, emitiendo radiación electromagnética preferentemente en ciertas direcciones del espacio. La periodicidad de los pulsos se puede entender mediante la analogía de un faro tradicional que emite luz para guiar a los navegantes. Si nos encontramos en la dirección adecuada, podremos observar pulsos de luz con la frecuencia de giro del sistema luminoso del faro. La primera observación de un púlsar, en 1967, se debe a Jocelyn Bell, que entonces estaba realizando su tesis doctoral.

Un púlsar binario consta de un púlsar y otro objeto celeste —otra estrella de neutrones en el caso de Hulse y Taylor— que orbitan uno alrededor del otro. Tratándose de dos cuerpos tan masivos, cabe esperar que emitan una cantidad considerable de energía mediante ondas gravitatorias, disminuyendo su distancia relativa con el transcurso del tiempo, reduciendo en consecuencia el periodo orbital y, por tanto, aumentando la frecuencia de los pulsos de las ondas electromagnéticas detectadas. Tras años de observaciones se comprobó que el periodo del sistema binario efectivamente disminuía, y lo hacía al ritmo predicho por la teoría general de la relatividad. Quedaba pendiente, no obstante, una detección directa de las ondas gravitatorias en algún laboratorio terrestre, algo extremadamente difícil y en el límite de la tecnología actual.

El Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser (LIGO, por sus siglas en inglés) está situado en Estados Unidos y consta de dos detectores: uno en el estado de Washington y otro en Luisiana, separados por una distancia de unos tres mil kilómetros. Aunque ambos actúan de manera independiente, el ruido instrumental es tan elevado que es necesaria una coincidencia entre los dos para aceptar que ha habido una posible señal, así como para localizar la procedencia de las ondas gravitatorias desde una cierta región del espacio. Desde luego, no es una tarea fácil.

Al alcanzar una onda gravitatoria los brazos perpendiculares del interferómetro (figura 5) se producen efectos contrarios: se



alarga uno y se contrae el otro, alterando el camino óptico de los láseres y modificando el patrón de interferencia. En realidad, LIGO funciona como un cronómetro de una precisión inaudita, pues las diferencias de tiempo de los recorridos de la luz láser en cada brazo producen variaciones en las franjas de interferencia que permiten inferir el paso de un tren de ondas gravitatorias. Hay que destacar también que la detección y el reconocimiento de tales ondas gravitatorias requiere previamente un ingente trabajo teórico de simulación de las posibles señales, pues cada proceso astrofísico genera un patrón diferente, ya sea la fusión de agujeros negros de distintas masas, el colapso de supernovas, etc.

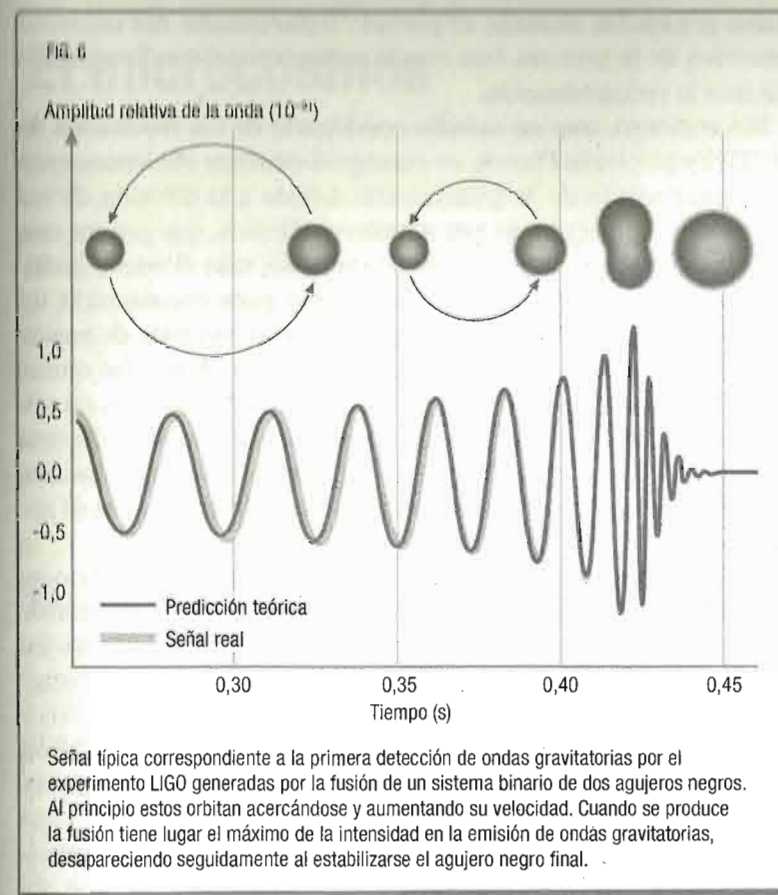
En febrero de 2016, LIGO anunció un descubrimiento histórico: la primera observación directa de ondas gravitatorias generadas por la colisión de dos agujeros negros, de 36 y 29 masas solares, que se encontraban a 1300 años-luz de distancia. De la fusión surgió un único agujero negro de 62 masas solares; la masa que falta, equivalente a tres masas solares, se convirtió en una enorme energía radiada en forma de ondas gravitatorias.

En la figura 6 se puede apreciar la predicción teórica según la relatividad general y la señal hallada tras su reconstrucción con los datos proporcionados por los detectores, mostrando una excelente concordancia. Obsérvese la escala de tiempo: la emisión de ondas gravitatorias transcurre en décimas de segundo, aunque los agujeros negros podrían haber estado orbitando uno alrededor del otro durante millones de años.

Hasta la fecha se han realizado ya tres observaciones de ondas gravitatorias procedentes de fusiones de agujeros negros de diferentes tamaños, lo que confirma la validez del descubrimiento. Más aún, la astronomía basada en ondas gravitatorias no se limitará en el futuro a detectar colisiones de agujeros negros. Se han desarrollado técnicas específicas para la búsqueda de ondas gravitatorias producidas en otros violentos acontecimientos celestes, desde explosiones de supernovas hasta estallidos de rayos gamma. Incluso se intenta encontrar directamente ondas gravitatorias emitidas por púlsares.

Europa también ha desarrollado observatorios de ondas gravitatorias: tenemos a Virgo, en Italia, y a GEO 600, en Alemania, de proporciones mucho más reducidas. Actuando coordinadamente, LIGO y Virgo incrementarán su potencial de detección, disminuyendo de forma significativa el posible ruido de fondo al buscar coincidencias entre las señales, y mejorando notablemente la localización de su procedencia. Además, en un futuro próximo se espera que otros observatorios se incorporen a la red de detectores terrestres, como LIGO-India o KAGRA en Japón.

Ya fuera de nuestro planeta, y como un ambicioso proyecto de la ESA, podemos destacar un futuro interferómetro espacial, LISA, que incrementará extraordinariamente la capacidad de detección de ondas gravitatorias. Se trata de tres naves espaciales dispuestas según un triángulo equilátero de un millón de kilómetros de lado, situadas en una órbita heliocéntrica detrás de la Tierra. Se espera que LISA sea lanzada hacia 2030, y que tenga la capacidad de detectar colisiones de agujeros negros supermasivos, como los que existen en el centro de prácticamente todas las galaxias, y también fondos de radiación gravitatoria de origen cosmológico, una verdadera frontera del conocimiento del universo.



En tal sentido, hay que citar la interesante posibilidad de encontrar huellas del Big Bang estudiando la polarización de la radiación del fondo cósmico de microondas. Al fin y al cabo, son ondas electromagnéticas que pueden oscilar en distintas direcciones (polarización), permitiendo llevar «impresas» las grandes perturbaciones del espacio-tiempo que existían durante su génesis como consecuencia de la inflación. En 2014, portavoces del experimento BICEP2, situado en el Polo Sur de la Tierra, anunciaron la detección de un tipo de polarización que se esperaría como resultado de la interacción de ondas gravitatorias primor-

diales generadas durante el periodo inflacionario del universo primitivo de la primera fase con la radiación del fondo cósmico durante la recombinación.

Sin embargo, tras un estudio combinado de los resultados de BICEP2 y la misión Planck, se consiguió eliminar eficientemente la contaminación de la polarización debida a la difusión de las ondas electromagnéticas por el polvo galáctico, que genera una polarización semejante. La señal resultante, tras el nuevo análisis, acabó siendo demasiado tenue como para considerarla un descubrimiento científico. Se requieren, pues, medidas de mayor precisión para aceptar o rechazar la hipótesis de que las ondas gravitatorias hayan dejado su huella en el fondo cósmico de microondas. Si se confirmara en el futuro, este hallazgo significaría un extraordinario respaldo a la teoría de la inflación cósmica, pues representaría una observación directa de sus efectos al haber quedado impresos en la radiación de fondo.

Debemos citar también la astronomía basada en neutrinos, que tan valiosa información ha proporcionado sobre la actividad termonuclear del Sol, así como del comportamiento de las supernovas al final de su vida. Las nuevas generaciones de detectores de neutrinos podrán, asimismo, aportar datos clave acerca del universo primigenio, cuando los neutrinos se desacoplaron de la materia, mucho antes que el fondo cósmico de microondas.

Hace más de cuatro siglos, Galileo Galilei revolucionó el conocimiento de la naturaleza al describir en su tratado astronómico *Siderius nuncius* (*El mensajero de las estrellas*) sus observaciones del cielo, realizadas con un rudimentario telescopio óptico que él mismo fabricó. No es descabellado pensar que la nueva astronomía, que combina distintos «mensajeros», como las ondas electromagnéticas, las gravitatorias y los neutrinos, revolucionará nuestro modo de contemplar y, por tanto, de entender el universo en el siglo XXI.

El microcosmos

El modelo estándar de la física de partículas ha proporcionado herramientas para explicar el comportamiento de la materia ordinaria y sus interacciones fundamentales una fracción de segundo tras el Big Bang. Sin embargo, para entender el universo en su totalidad es necesario ir más allá, proponiendo extensiones que superan los límites del conocimiento actual.

Hasta ahora hemos examinado la aparición y desarrollo de las grandes estructuras cosmológicas, desde las galaxias primitivas hasta la Gran Muralla, durante unos 13800 Ma tras el Big Bang. Si comparamos la evolución del universo durante esa larga época con la ejecución de una sinfonía, la gravedad ha llevado la batuta dirigiendo los grandes movimientos de los cuerpos celestes y sus agrupaciones.

En este grandioso cuadro cósmico no hay que olvidar, empero, la génesis de la propia materia ni de las fuerzas que le proporcionan estabilidad, el «cemento» básico de los constituyentes del universo. Así pues, en este capítulo dirigiremos nuestra atención hacia la segunda fase del universo de las tres que distinguimos al comienzo del libro: desde el fin de la inflación hasta la recombinación y la emisión del fondo cósmico de microondas.

Afortunadamente, se dispone en la actualidad de grandes instalaciones experimentales, como el LHC en el CERN, donde se pueden reproducir y estudiar, a pequeña escala, las condiciones de temperatura y densidad de energía que tuvieron lugar en aquella remota edad del universo primitivo. No hay duda de que sin un conocimiento de las propiedades íntimas de la materia, lo

que se conoce como microcosmos, no se puede aspirar a comprender el universo en su conjunto.

PARTÍCULAS Y VACÍO

La experiencia cotidiana con los objetos ordinarios que nos rodean sugiere que la materia, al igual que el espacio y el tiempo, forma un continuo, es decir, puede dividirse indefinidamente. Los antiguos griegos, particularmente Aristóteles y sus seguidores, elevaron esta observación a la categoría de doctrina filosófica, adoptando el concepto de elemento procedente de los anteriores filósofos presocráticos: Tales, Anaximandro, Anaxímenes, Empédocles... Así, los elementos —tierra, agua, aire y fuego, y más tarde el éter— se combinan para generar la materia con sus diversas formas y propiedades. Esta versión, errónea y simplista, se impuso durante milenios como un dogma de raíces autoritarias y científicamente improductivo.

Por otro lado, la gran alternativa filosófica en la Antigüedad a la visión aristotélica fue la teoría atomista, minoritaria entre los pensadores de la época. Según esta, los átomos se movían al azar, aunque sujetos a leyes deterministas, sin armonías ni finalismos, o mundos ideales de ubicación dudosa. No quedaba espacio ni razón para acciones o intervenciones de carácter sobrenatural o divino, por lo que, desde sus comienzos, adquirió un cariz sospechosamente cercano al ateísmo, socialmente peligroso según las autoridades políticas y religiosas de entonces.

Desde el punto de vista de los antiguos atomistas, e ignorando el presunto *horror vacui* aristotélico, el cosmos consistía en un espacio ilimitado y vacío por el que se movían los átomos —los verdaderos elementos, invisibles e indivisibles, constituidos por una sustancia común— agregándose entre ellos para formar los cuerpos materiales. El método de conocimiento era puramente observacional, y la existencia de un límite al proceso de partición mecánica de los cuerpos era una suposición. Así, razonaba Demócrito, «cuando cortamos una manzana, el cuchillo ha de pasar a través de espacios vacíos entre los átomos. Si no hubiese

tales espacios vacíos, el cuchillo toparía con los átomos impenetrables y no podríamos cortar la manzana». Ciertamente, tal visión intuitiva y simple no está lejos de la interpretación moderna de la materia, dominada por grandes vacíos y partículas en las que se concentra la masa. Sin embargo, el enfoque utilizado por los filósofos atomistas no estaba fundamentado en la experimentación, ni en medida cuantitativa alguna, por lo que no se puede considerar compatible con el método científico actual.

Hubo que esperar hasta la hipótesis atómica de Dalton, de 1803, basada en las leyes empíricas y cuantitativas de la combinación química, para el nacimiento de la química moderna. Por otro lado, la clasificación de los elementos químicos según la famosa tabla iniciada por Dmitri Mendeléyev en 1869 puso de manifiesto la asombrosa periodicidad de sus propiedades químicas, señalando la existencia de una estructura interna. En consecuencia, los átomos no deben considerarse como verdaderamente elementales, pese a que aún se designan como elementos químicos.

Ahora bien, la periodicidad de las propiedades de los elementos químicos no bastaba, ni basta en ningún caso, para establecer científicamente la realidad de los átomos, llegando algunos científicos de principio del siglo xx, como Ernst Mach, a considerarla como una cuestión metafísica ante la imposibilidad de su observación directa, al menos con los medios de entonces.

Tuvieron que pasar varios años hasta que se comprobó experimentalmente la existencia real de los átomos, más allá de la validez de la idea intuitiva inicial, siendo Einstein pionero con su interpretación del movimiento browniano en 1905. Este fenómeno consiste en el movimiento aleatorio que se observa en pequeñas partículas suspendidas en un fluido. Einstein lo explicó recurriendo a la existencia de moléculas de fluido, calculando el efecto de su colisión contra las partículas. A la postre, los átomos resultaron ser divisibles, pues, por ejemplo, pueden desintegrarse como consecuencia de la radiactividad natural o artificial, o sufrir transmutaciones mediante reacciones nucleares como

Por convención, caliente; por convención frío. Por convención, dulce; por convención, amargo. En realidad, solo átomos y vacío.

DEMÓCRITO DE ABDERA

las que suceden en las estrellas o en las centrales nucleares. Hoy en día es posible incluso visualizarlos individualmente y manipularlos mediante el microscopio de efecto túnel.

Quarks: elementales pero nunca libres

A principios del siglo xx, Ernest Rutherford puso de manifiesto la estructura interna de los átomos al bombardear una fina lámina de oro con núcleos de partículas alfa, es decir, núcleos de helio-4 procedentes de la radiactividad natural, constituidos por dos protones y dos neutrones y, por tanto, con carga positiva. Los resultados hallados constituyeron una sorpresa. Para explicar por qué una fracción notable de las partículas alfa era desviada con ángulos cercanos a 180° , saliendo las partículas prácticamente rebotadas, Rutherford tuvo que suponer que la carga positiva estaba concentrada en una pequeña región del átomo.

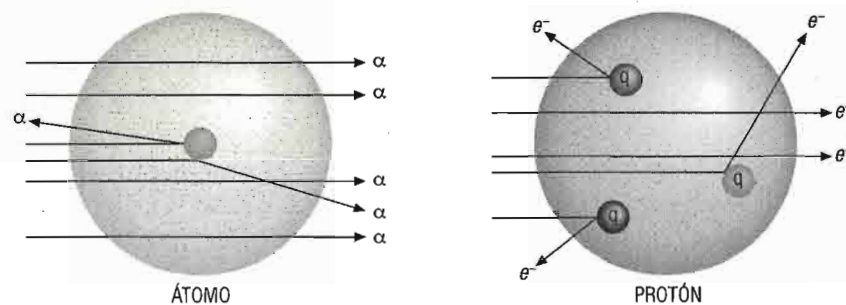
Ahora sabemos que, efectivamente, un átomo está constituido por un núcleo formado por protones y neutrones en distinto número, que contiene toda la carga positiva y casi toda la masa del átomo, y una nube de electrones, con carga negativa, «orbitando» alrededor. Hasta mediados del siglo pasado, protones, neutrones y electrones bastaban para explicar la materia ordinaria que nos rodea. Sin embargo, al perfeccionarse las técnicas de detección se fueron descubriendo más «especies» de partículas.

Al igual que sucede en biología, donde se habla de reinos, como el reino animal o el reino de las plantas, las partículas descubiertas se fueron clasificando en dos grandes categorías. Por un lado, los *hadrones*, como el protón, el neutrón o el pión, que «sienten» la interacción fuerte o nuclear; por otro, los *leptones*, como el electrón y el neutrino, totalmente ciegos a esa fuerza. Con la puesta en marcha de aceleradores más y más potentes, el ahora llamado «zoo de partículas» fue incrementando su contenido hasta contar con más de un centenar de «especies», principalmente hadrones. Además, presentaban una serie de regularidades que hicieron sospechar que la historia del átomo y de la tabla periódica podría repetirse... como en efecto sucedió.

La posibilidad de que los hadrones tuvieran una naturaleza compuesta empezó a contemplarse al constatar un patrón de propiedades similares o *simetrías* entre distintas partículas, hadrones en particular, que por aquel entonces aún se consideraban elementales. Durante un tiempo se pensó que el concepto fundamental en la naturaleza eran tales simetrías, pero la interpretación natural en términos de constituyentes más elementales, denominados *quarks*, se abrió camino finalmente. Ahora bien, para aceptar plenamente la existencia de los quarks como componentes de los hadrones era necesaria una demostración equivalente a la dispersión de Rutherford de partículas alfa por núcleos, que proporcionara una evidencia directa acerca de su realidad, más allá del formalismo matemático, por muy potente y predictivo que sea.

En una serie de experimentos llevados a cabo en la década de 1970, de difusión de electrones por protones y neutrones, pudo constatar que en su interior existían unos «puntos duros», sin extensión, que recibieron el nombre de *partones* («las partes de los hadrones»). Estos se comportaban como centros de dispersión de los electrones incidentes, de un modo análogo a lo que ocurría en el experimento de Rutherford (figura 1). Tales constituyentes puntuales en principio, resultantes de la observación

FIG. 1

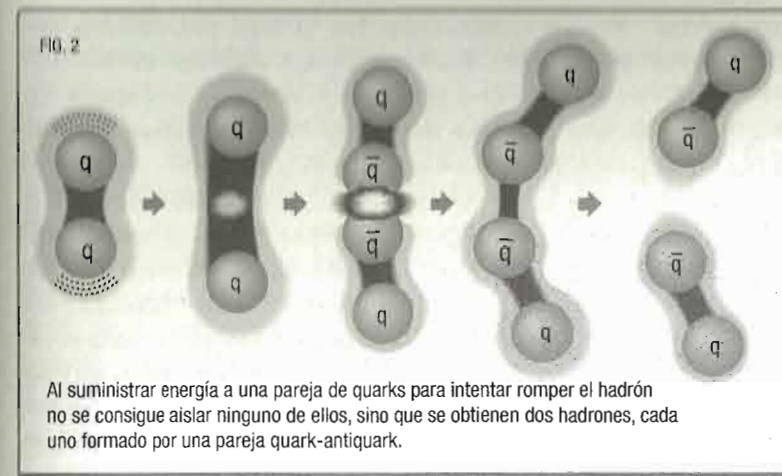


A la izquierda, ilustración del experimento de Rutherford: al bombardear un átomo con partículas alfa, estas rebotan al chocar con el núcleo. A la derecha, un protón desvía los electrones incidentes cuando estos chocan con los «puntos duros» correspondientes a los quarks.

experimental, se identificaron con los quarks procedentes de las simetrías derivadas de las propiedades estáticas de los hadrones, proporcionando una prueba verosímil de su existencia física real, y de que no se trataba de un mero constructo matemático basado en simetrías.

Resulta relevante señalar que, al contrario que los electrones, los quarks no pueden existir aislados, sino que siempre han de estar confinados dentro de los hadrones. La razón estriba en el tipo de interacción que experimentan unos y otros. Básicamente, el electromagnetismo es una interacción que decrece con la distancia, por lo que electrones y núcleos pueden llegar a desligarse —ionizándose el átomo— si se proporciona la energía suficiente. En cambio, en el caso de los quarks la fuerza que los une tiene un comportamiento totalmente distinto, recordando a un muelle que cuando más se estira, más fuerza hay que hacer para extenderlo. La interacción fuerte entre quarks ¡crece con la distancia! Aunque dentro de un rango limitado, pues en realidad es de corto alcance. ¿Cómo se entiende esto? Si proporcionamos más y más energía a un hadrón para intentar «romperlo» y aislar un quark, solo conseguiremos crear más hadrones, una vez que la energía suministrada supere un cierto umbral (figura 2).

Los quarks poseen carga eléctrica fraccionaria (expresada en unidades de la carga de un electrón, $1,6 \cdot 10^{-19}$ C) y también la denominada *carga de color*. En este contexto, el color es un atributo más de los quarks, un número cuántico, que nada tiene que ver con el concepto utilizado en óptica de la visión y relacionado con la frecuencia de la luz visible. La razón del nombre es que, para explicar las propiedades de las partículas elementales, se precisaban tres tipos diferentes de cargas, cuya superposición en un hadrón las cancelaba como se cancelan las cargas eléctricas opuestas en un átomo. La habitual teoría del color proporcionó esta llamativa nomenclatura, pues hay tres colores primarios cuya combinación puede dar blanco. Debido a esa propiedad común se eligieron los nombres de rojo, verde y azul para las tres posibles cargas de color. Así, los quarks constituyentes de un protón han de tener los tres colores para que, globalmente, sea blanco, lo que significa ausencia de carga de color.



Pese a que nunca se hayan observado quarks aislados, la interpretación de los hadrones en términos de quarks como entes reales —aunque confinados en el interior de aquellos— ha cosechado éxito tras éxito al aplicarse a los numerosos fenómenos analizados. No obstante, el confinamiento de los quarks todavía no ha podido demostrarse rigurosamente, lo que constituye otro límite de nuestro conocimiento del microcosmos.

EL MODELO ESTÁNDAR

A medida que se ha ido penetrando en el interior de la materia utilizando sondas más energéticas, como electrones, fotones o neutrinos, se han ido descubriendo subestructuras formadas por constituyentes de dimensiones cada vez más reducidas. Hemos visto que protones y neutrones no son realmente elementales, pues muestran una estructura compleja al ser examinados en profundidad. En cambio, se cree que quarks, electrones y neutrinos (estos dos últimos conjuntamente designados como *leptones*) sí lo son. Pero ¿qué significa que una partícula es elemental?

Según el paradigma actual de la física de partículas, una partícula es elemental si es puntual, es decir, carece de extensión espacial

y, en consecuencia, no tiene estructura interna. En cambio, está caracterizada por su masa, carga eléctrica o de otros tipos, espín (como si girase alrededor de sí misma) y otras propiedades o números cuánticos, asociados a un punto matemático en el espacio. Puede resultar chocante relacionar tal cúmulo de propiedades con

El libro del universo está escrito
en lenguaje matemático.

GALILEO GALILEI, *IL SAGGIATORE*, 1623

un mero punto matemático. Por ejemplo, como el electrón tiene masa pero carece de extensión podríamos concluir que ¡su densidad debe ser infinita!

De hecho, cuando se expresa la masa del electrón mediante el lenguaje cuántico también aparecen infinitos. Y es que los infinitos campan a sus anchas en física de partículas, por lo que hay que aceptarlos y aprender a «domesticarlos», para poder extraer respuestas finitas y con sentido una vez que se comparan los cálculos teóricos con los resultados de los experimentos.

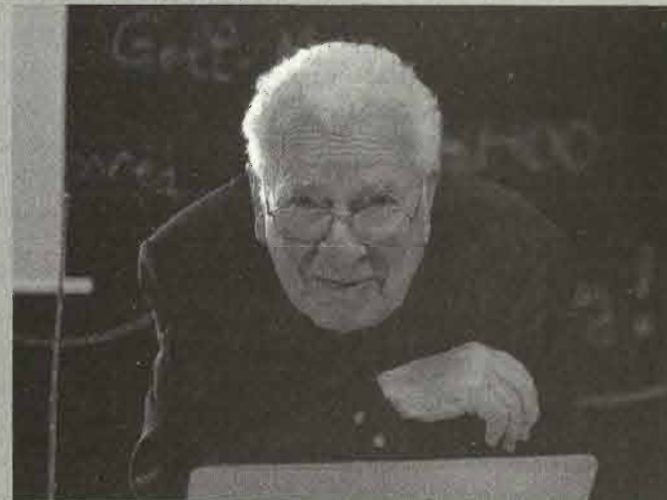
Una partícula elemental no debería, pues, representarse como una bolita, ni siquiera con un radio minúsculo, aunque sea difícil desprenderse mentalmente de esa imagen. De hecho, hay límites experimentales muy estrictos para el tamaño máximo tanto de quarks como de electrones, así como de sus posibles estados excitados que implicarían una subestructura y, en consecuencia, un carácter no elemental. Todos los datos empíricos acumulados hasta ahora respaldan la hipótesis de que tanto quarks como electrones, en sus diversas variedades, constituyen partículas puntuales. En el caso del electrón, por ejemplo, experimentos muy precisos han establecido que su radio es inferior a 10^{-22} m.

Así pues, quarks y leptones, considerados como partículas puntuales, se encuadran dentro de la categoría de los *fermiones* y constituyen los «verdaderos elementos» de la materia que describe el históricamente denominado modelo estándar de la física de partículas («estándar» por servir de referencia debido a su gran éxito para describir los fenómenos conocidos). En realidad el modelo estándar debería considerarse más como una teoría que como un modelo, es decir, su estatus es superior. Utiliza el lenguaje de la teoría cuántica para describir matemáticamente y de manera precisa las propiedades de la materia y sus interac-

ALGUNOS CURIOSOS NOMBRES DE LAS PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

Encontrar nuevos (y apropiados) nombres para las partículas fundamentales no siempre es tarea fácil. Presentamos aquí algunos de ellos y su origen.

- *Protón* viene del griego *prōtos*, que significa «primero». El término fue acuñado por el químico Svante Arrhenius para definir al ion de hidrógeno (H^+), constituyente básico de la materia a escala atómica.
- El término *electrón* fue utilizado por primera vez en 1891 por el físico Johnstone Stoney a partir del vocablo griego *ēlektron*, que designaba al ámbar, por sus propiedades electrotáticas.
- *Quark* es una palabra inventada procedente de una obra de James Joyce, *Finnegans Wake* (1939), adoptada después por el físico Murray Gell-Mann para designar los compuestos elementales de los hadrones.
- *Hadrón* proviene de *hadros*, que en griego significa «fuerte». En esta categoría se incluye a todas las partículas que experimentan la interacción fuerte o nuclear, como el protón, el neutrón y el pión.
- *Barión* viene del griego *barys*, que significa «pesado». Con este nombre se designan las partículas subatómicas formadas por tres quarks, como el protón y el neutrón.
- *Mesón* proviene de *mésos*, que en griego significa «en medio». Los primeros en ser descubiertos presentaban una masa intermedia entre la del electrón y la del protón, aunque después se han hallado mesones más masivos.
- *Gluón* procede del término inglés *glue*, que significa «pegamento». Es el cuanto del campo de la interacción fuerte, que mantiene unidos los quarks, característica de la que deriva su nombre.



El físico estadounidense y premio Nobel Murray Gell-Mann, que bautizó a los quarks, fotografiado durante una conferencia en 2012.

ciones, exceptuando la gravitación. Por otro lado, existe otro grupo de partículas elementales: los bosones, las partículas portadoras de fuerza, como el fotón y la partícula de Higgs, que no es ni materia ni fuerza, como veremos más adelante.

Los hadrones, por su parte, son partículas subatómicas no elementales que pueden ser de dos tipos: *bariones*, formados por tres quarks, como el protón y el neutrón, y *mesones*, formados por un quark y un antiquark, antipartícula del quark en la que nos detendremos más adelante. Los mesones, como el pión, son inestables y se desintegran rápidamente.

Aunque el modelo estándar sostiene que quarks, electrones y neutrinos son partículas puntuales, sin estructura interna, y representan el último eslabón de la cadena, muchos físicos piensan que aún no se ha llegado al final de la escalera y que debe encontrarse una estructura aún más fundamental. Los hipotéticos constituyentes de quarks y electrones se denominan *preones*, aunque todavía no se ha encontrado ninguna evidencia experimental de su existencia. Por otro lado, la teoría de cuerdas sostiene que existe una estructura más elemental, pero no puntual, denominada *cuerda*, cuyos distintos modos de vibración generarían las propiedades de las diferentes partículas, tanto de materia como de fuerza.

Se han descubierto tres (y solo tres) generaciones o familias de quarks y leptones, que se recogen en la que se puede considerar como la nueva tabla de los elementos (figura 3). Se distinguen seis sabores de quarks con nombres más o menos curiosos: *up* (arriba), *down* (abajo), *charm* (encanto), *strange* (extraño), *top* (cima) y *bottom* (fondo). Las denominaciones «sabor» y «color» son arbitrarias pero sugerentes: los quarks pueden cambiar de sabor y color mediante las interacciones.

Dentro del modelo estándar, la primera generación de partículas, integrada por los quarks *up* y *down* junto con electrones y neutrinos de tipo electrónico y sus interacciones, explica toda la materia ordinaria que nos rodea y de la que nosotros mismos estamos constituidos. Las otras generaciones son réplicas de la primera, pero con masas mucho mayores. Por ejemplo, el quark *top* tiene una masa del orden de un átomo de oro, pero vive realmen-

LAS TRES GENERACIONES DE LA MATERIA
(FERMIONES)

FIG. 3

	I	II	III	
	u up	c charm	t top	γ fotón
QUARKS	d down	s strange	b bottom	g gluon
	ν_e electrón neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z fuerza débil
LEPTONES	e electrón	μ muon	τ tau	W fuerza débil
				BOSONES

Tabla del modelo estándar de las actualmente consideradas partículas elementales y los bosones o portadores de fuerza: fotón (electromagnética), gluon (fuerte) y bosones Z y W (débil). No se incluye al gravitón, portador de la interacción gravitatoria según la teoría de la gravedad cuántica, que aún no se ha detectado, ni el bosón de Higgs, pieza imprescindible en el modelo estándar, que no es ni materia ni fuerza.

te muy poco, pues rápidamente se desintegra en quarks de masa inferior hasta acabar como materia ordinaria. La razón por la cual solo hay tres generaciones o sabores, y no más, permanece hoy en día como uno de los grandes enigmas de la física de partículas, marcando otro límite en el conocimiento del microcosmos.

Simetrías en la naturaleza e interacciones

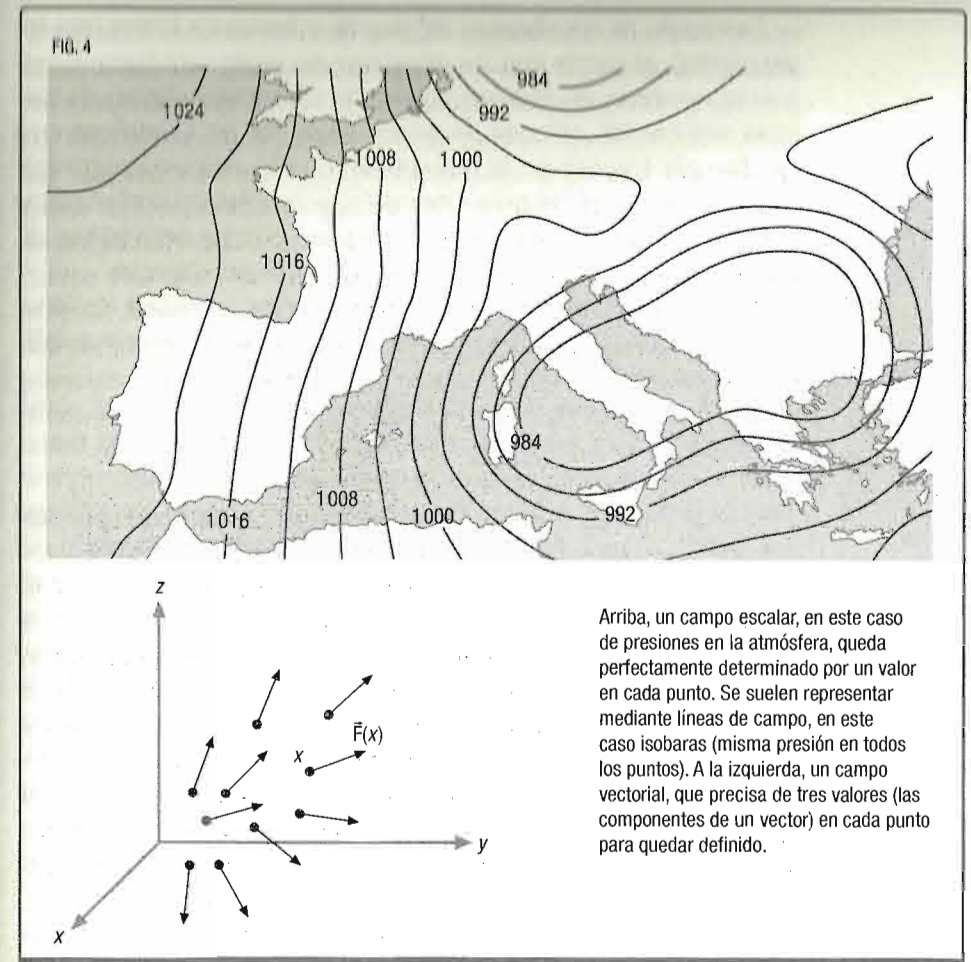
Centrémonos ahora, dentro del modelo estándar, en el análisis de las interacciones entre partículas y sus desintegraciones. Quarks y leptones interactúan mediante tres tipos de fuerzas, dejando al margen por el momento a la gravedad, mucho más débil y que hasta ahora no ha podido describirse en el marco de la teoría cuántica. Las fuerzas se distinguen fundamentalmente

por su grado de intensidad, aunque dos de ellas, la electromagnética y la débil, se han conseguido describir conjuntamente dentro de un marco teórico común: la interacción electrodébil. Este proceso teórico integrador se conoce como unificación de las fuerzas. La más intensa de todas en el universo actual es la interacción fuerte, responsable de la formación de protones y neutrones a partir de los quarks, y de la ulterior estabilidad de los núcleos y, por tanto, de los átomos y la materia ordinaria.

En general, un sistema físico posee una determinada simetría cuando sus propiedades no se ven afectadas por alguna transformación, como por ejemplo una rotación espacial, una traslación temporal o la imagen especular. En particular, el concepto de simetría juega un papel fundamental en la formulación de la física, y muy especialmente en física de partículas.

Así, las interacciones entre las partículas elementales pueden considerarse como consecuencia de la existencia de las llamadas *simetrías gauge* o simetrías de escala, que se puede ilustrar de forma simplificada con un ejemplo clásico. Para ello, consideremos un condensador formado por dos placas paralelas entre las cuales se establece una determinada diferencia de potencial. Si variamos el valor del potencial de una placa, manteniendo constante la separación entre placas, el potencial de la otra ha de tomar el valor adecuado para que la diferencia de potencial entre ambas permanezca fija. En este contexto, el campo eléctrico se asemeja a un mensajero que nace como una necesidad de «reconciliar» cualquier variación del valor del potencial elegido para una placa en particular. Antes de generalizar este argumento simple para campos cuánticos, recordemos en qué consiste un campo en física clásica.

Matemáticamente, un campo clásico se representa mediante una función continua de las tres variables espaciales y del tiempo. Un ejemplo lo constituye un campo escalar de presiones en un mapa del tiempo, donde a cada punto del plano (definido a una cierta altura) se le asocia una presión concreta. Si en vez de un único valor, a cada punto del espacio se le asocia un vector, definido por tres valores independientes (por ejemplo, módulo, dirección y sentido), entonces resulta un campo vectorial (figura 4). Así, suponiendo un campo eléctrico definido entre las placas de un condensador, a cada



punto del espacio le corresponde un vector cuya magnitud puede variar de manera continua, según cambiemos el potencial entre las placas. En cambio, y esto constituye una característica esencial, en un campo cuántico la magnitud en cada punto ya no puede variar de manera continua. En el mundo macroscópico puede resultar chocante esta imposibilidad, pero en el microcosmos la teoría cuántica impone este tipo de reglas. Al contrario del aforismo utilizado por Leibniz, *Natura non facit saltus*, la naturaleza sí da saltos.

Partiendo de un sistema de quarks y leptones libres (sin interacción), al exigir que las simetrías gauge se satisfagan localmente, es decir, en lugares y tiempos diferentes, surgen de manera natural los campos de interacción que se identifican con las fuerzas básicas de la naturaleza. Desde esta perspectiva, y como vimos en el ejemplo clásico del potencial entre placas, los campos de fuerza emergen como mensajeros que reconcilian diferentes elecciones de escala en cada punto del espacio.

Aquellos campos que derivan del anterior principio se denominan *campos gauge*: los campos de las interacciones electrodébil y fuerte lo son.

Vamos a mostrar una analogía de los campos gauge como mensajeros para reconciliar diferentes convenciones en física, equivalentes a elecciones de escala o gauge. Para ello, retomemos la definición original de la unidad de longitud en el Sistema Internacional, el metro, como la diezmillonésima parte del cuadrante de un meridiano de la Tierra. Esta convención está completamente obsoleta actualmente, pero sirve para nuestro propósito. Ahora supongamos que los habitantes de otro planeta adoptan la misma convención: su metro será también la diezmillonésima parte del cuadrante de su meridiano. Ahora bien, como el radio de su planeta será diferente al de la Tierra, se obtendrán dos metros (escalas) diferentes para la medida de la longitud. Sin embargo, la física descrita por ambas civilizaciones ha de ser la misma, pues las leyes así lo son, invariantes de escala, y no puede depender de una convención u otra. Para entenderse, necesitan un «mensajero» que informe de la relación de escala entre ambos patrones de longitud, sus distintos metros. Ese papel lo puede jugar la luz, que es un campo gauge, de alcance infinito, pues los planetas pueden estar muy alejados entre sí.

Los campos de fuerza derivan de la exigencia de la simetría gauge impuesta a la teoría de partículas sin interacción. Este planteamiento confiere al formalismo una mayor capacidad predictiva, gozando además de un mayor atractivo intelectual ya que nacen de forma más natural que si se postularan *ad hoc*, reconociendo *a posteriori* la propiedad de su invariancia gauge.

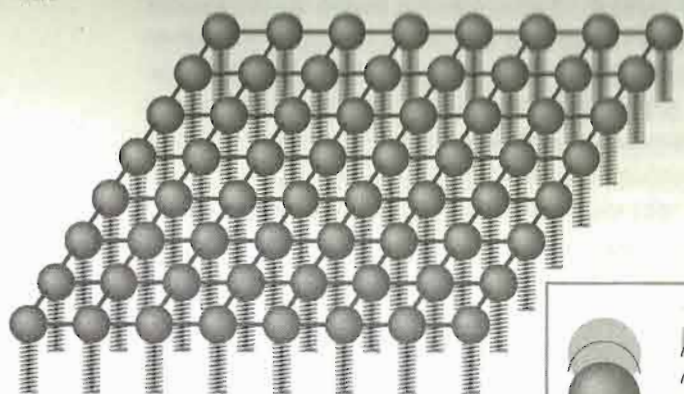
Por otro lado, el alcance de los campos de interacción gauge debería ser siempre infinito, consecuencia lógica de su misión como mensajeros de la reconciliación de escala local y arbitraria, en todo punto del espacio y del tiempo, pues no puede quedar ninguna región del universo sin cubrir. No obstante, puede haber diferentes circunstancias que finalmente limiten el radio de acción de las interacciones, como es el caso de la interacción fuerte. Por ejemplo, los gluones, cuantos del campo de la interacción fuerte, transportan carga de color, lo que les confiere sus propiedades características, haciendo que sean muy «pegajosos» entre sí, y que el alcance de la interacción fuerte sea del orden del tamaño de un protón ($1 \text{ fermi} = 10^{-15} \text{ m}$).

Teoría cuántica de campos

El concepto original dentro de la física clásica de acción a distancia se debe a Isaac Newton al explicar la interacción gravitatoria de los cuerpos, por ejemplo, entre la Tierra y una manzana, o entre la Tierra y la Luna, lo que constituyó una primera y extraordinaria unificación de fuerzas gracias al genio de Newton. Sin embargo, el concepto clásico de campo de fuerzas se debe principalmente al trabajo de físicos como Michael Faraday y James Clerk Maxwell, al estudiar el electromagnetismo. Hoy en día los campos electromagnéticos y gravitatorios son ejemplos paradigmáticos de la física clásica.

Sin embargo, ahora sabemos que para entender los fenómenos naturales con precisión y en profundidad, hay que introducir los efectos cuánticos en cualquier teoría clásica, tanto de materias como de fuerzas. Un ejemplo paradigmático lo constituye la doble naturaleza de la luz, que unas veces se comporta como onda, difractándose y produciendo interferencias, y otras como corpúsculo, dando lugar al efecto fotoeléctrico. La sutil solución a esa aparente paradoja es que los modos de vibración del campo se cuantizan, es decir, no pueden tomar valores arbitrarios de energía. Entonces un campo de fuerza se visualiza como una malla invisible de infinitos «osciladores» cuánticos (figura 5), que se extiende por todo

FIG. 5



Visualización de un campo cuántico como una malla infinita de osciladores cuánticos, representados por los muelles verticales con una masa en un extremo, acoplados entre sí por bandas elásticas horizontales, que no pueden vibrar de un modo continuo, sino solo en múltiplos de una amplitud mínima.



La amplitud de las oscilaciones solo puede tomar valores discretos.

el espacio, activándose y desactivándose con el tiempo, aunando la interpretación ondulatoria y corpuscular. Así por ejemplo, un frente de luz está gobernado por una *onda de probabilidad* que guía y distribuye los cuantos del campo (fotones) según las leyes conocidas de la óptica. Al realizar una cierta observación o medida el fotón «se materializa» en un determinado punto del espacio según una ley de probabilidad que lo rige. Esa es la esencia de la «magia cuántica».

Pero ¿acaso se pueden definir campos cuánticos de materia, como electrones, por ejemplo, de un modo análogo a un campo electromagnético? La respuesta es un rotundo «sí».

Los electrones pueden difractarse, desviándose de su trayectoria rectilínea, al ser interceptados por un objeto, produciendo interferencias al igual que la luz. Los microscopios electrónicos constituyen una conocida aplicación de esa notable propiedad. Por tanto, la doble naturaleza, onda-corpúsculo, tanto de la luz como de los electrones ha de tener cabida natural dentro de la de-

nominada teoría cuántica de campos (TCC), que aplica los principios de la mecánica cuántica a todo tipo de campos, tanto de materia como de fuerza. En el caso de los electrones nos referimos a campos de materia. Así, un electrón se interpreta como un cuanto del campo de materia que «emerge» del vacío del mismo modo que un fotón representa un cuanto del campo electromagnético. En general, electrones, fotones, gluones y demás partículas elementales y de fuerza se pueden contemplar como «gránulos» de energía concentrada en un punto del espacio y con una serie de características propias, como masa, carga, espín..., que se determinan a partir de medidas experimentales en el laboratorio.

Si hemos incorporado la teoría cuántica a la descripción de los campos de fuerza y de materia, no debemos olvidar la otra gran revolución científica de principios del siglo xx que cambió la forma de entender la física. Por supuesto, nos estamos refiriendo a la teoría de la relatividad especial de Einstein, que relaciona masa y energía según la conocida fórmula de $E = m \cdot c^2$, donde E es la energía, m es la masa y c es la velocidad de la luz en el vacío. Por tanto, la TCC ha de incorporar a la relatividad especial de Einstein, permitiendo la transmutación de energía en materia y viceversa. De ese modo, un campo continuo cuántico es ahora equivalente a un sistema de partículas discretas (los cuantos del campo) cuyo número no es constante, ya que pueden crearse y destruirse como consecuencia de las interacciones y según la relación de energía-masa de la relatividad einsteiniana.

Simetría imperfecta en física de partículas

La simetría en la naturaleza y en el arte muchas veces es sinónimo de belleza. Por el contrario, un rostro muy asimétrico suele asociarse a fealdad y produce un rechazo instintivo. Sin duda, es una herencia de nuestro pasado evolutivo como especie, que identifica simetría con salud y reproducción. Sin embargo, un cierto grado de asimetría puede llegar a ser altamente apreciado, pues un rostro totalmente simétrico suele resultar algo antinatural.

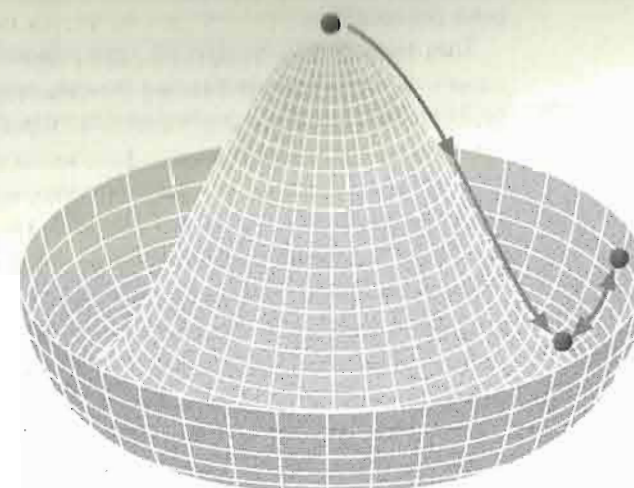
De igual modo, aun jugando un papel fundamental en la descripción de la naturaleza, las simetrías no siempre son perfectas en el modelo estándar. Se habla entonces de *ruptura de simetría*, por ejemplo, del vacío. Y su efecto es «beneficioso» para la vida al dotar de masa a partículas y portadores de fuerza.

El campo de Higgs se introduce en el modelo estándar para dotar de masa a portadores de fuerza y partículas elementales, rompiendo la simetría gauge subyacente de manera sutil. Para ello el campo de Higgs posee un estado de vacío correspondiente a diversas configuraciones posibles. Se suele visualizar, hasta cierto punto, mediante la imagen de la figura 6, parecida a un sombrero mexicano, donde la bolita «busca» alcanzar el estado de mínima energía potencial situado en la parte inferior. Observemos que cualquier posición de abajo es igualmente posible (¡hay simetría del vacío!), pero la bolita (el campo) adopta finalmente un estado concreto de manera espontánea, es decir, sin la acción dinámica de otra fuerza. Este proceso se conoce como ruptura espontánea de la simetría del vacío o *mecanismo de Higgs*, por el cual los bosones intermediarios de la interacción electrodébil W y Z se hacen masivos, respetando la masa nula del fotón. La esencia del razonamiento es que el grado de libertad que se pierde al fijar la posición de mínima energía de la bolita en algún punto del valle de abajo, se transfiere a un portador del campo de fuerzas, inicialmente sin masa y de alcance infinito, reduciéndose drásticamente su radio de acción efectivo. Observemos que la bolita aún puede oscilar ligeramente alrededor de la posición fijada como mínima energía, señalada por la flecha de doble sentido. Ese grado de libertad remanente tras la ruptura de simetría del vacío se corresponde con el bosón de Higgs, descubierto en el LHC en 2012.

Destaquemos que, en el mismo proceso, quarks y leptones también adquieren masa como consecuencia de su interacción con el bosón de Higgs. La pintura *Niñas en el mar* (1909), de Joaquín Sorolla, que se muestra en la imagen superior de la página 83, puede ilustrar la adquisición de masa de quarks y leptones debido a su interacción con el bosón de Higgs: según sea la fricción entre el agua del mar —que hace el papel del campo de

FIG. 6

El vacío del campo de Higgs representado mediante una bolita. Inicialmente el campo se encuentra en un estado de falso vacío, en la parte superior del «sombbrero mexicano» que representa su energía potencial. La situación es completamente simétrica hasta que se rompe la simetría del vacío y cae hasta el vacío verdadero, de más baja energía. Una vez allí, el campo aún puede seguir oscilando como indica la doble flecha, interpretándose como el bosón de Higgs descubierto en el LHC.



Higgs— y las partículas —las niñas que caminan por la playa— la masa tomará un valor u otro. Si no hay fricción, lo que correspondería a caminar por la orilla, la masa es nula y la velocidad máxima; si la fricción es grande, como ocurriría al caminar por aguas profundas, la masa es elevada y la velocidad, baja.

Las antipartículas entran en escena

En la década de 1920, el físico inglés Paul A.M. Dirac formuló una ecuación simultáneamente cuántica y relativista para el electrón. Ahora bien, las partículas que describía podían tener energía tanto positiva como negativa. Una primera idea fue descartar los estados de energía negativa por absurdo, pues tanto la masa como la energía cinética de los cuerpos toman siempre valores positivos. Sin embargo, las transiciones entre ambos estados eran posibles cuánticamente, y en física lo que no está prohibido debe suceder, por lo que Dirac conjeturó que, para impedir las transiciones hacia esos estados de energía menor, el

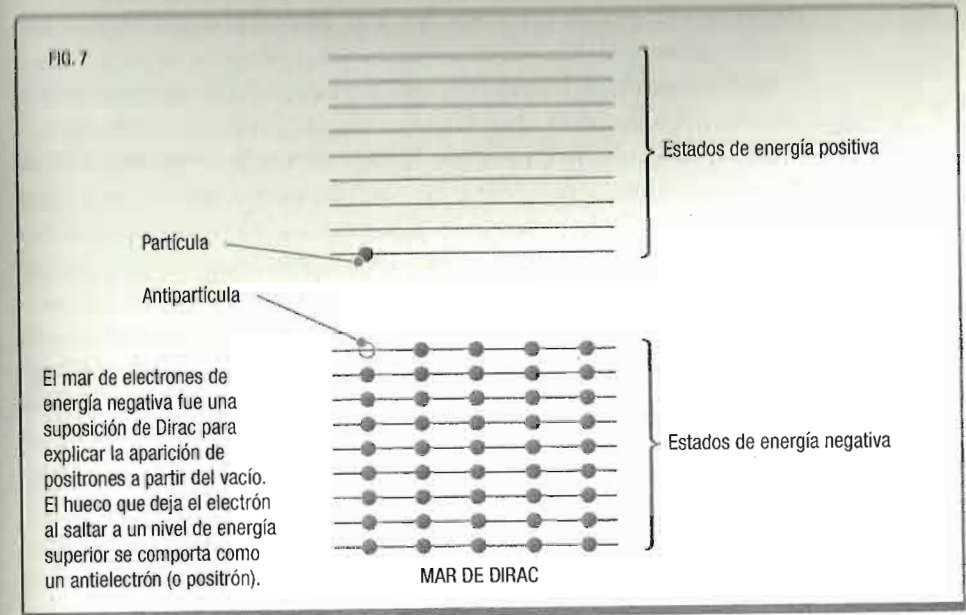
vacío estaba completamente lleno de electrones, los cuales no eran detectables.

Tan asombrosa conjetura, que suponía la existencia de un «mar» de infinitos electrones no era, empero, una mera elucubración teórica sin consecuencias observables. Por el contrario, una de sus sorprendentes predicciones era que si se dotaba de suficiente energía, por ejemplo, mediante un fotón, a uno de esos electrones del *mar de Dirac* —tal y como se le conoce para dar a entender su amplitud— ese electrón pasaría a ser observable, dejando un «hueco» que se comportaría como una antipartícula (figura 7). Se materializa así un par partícula-antipartícula, que parece surgir de la nada, aunque por la ley de conservación del momento lineal se requiere un átomo cercano que intervenga para que la creación de pares pueda tener lugar.

El mar de electrones de energía negativa fue una suposición de Dirac para explicar la aparición de positrones (antielectrones) a partir del vacío. El hueco que deja el electrón al saltar a un nivel de energía superior se comporta como un antielectrón.

A Dirac cabe otorgar, entre otros muchos, el extraordinario mérito de predecir la existencia de la antimateria, aunque inicialmente identificara a los antielectrones como protones, ya conocidos. Como él mismo admitió más tarde, no tuvo en ese momento el coraje de suponer que se trataba de una nueva (anti) partícula todavía por descubrir. Fue el físico estadounidense Robert Oppenheimer, conocido por liderar el Proyecto Manhattan para la construcción de la primera bomba atómica, uno de los primeros en criticar tal identificación del hueco y el protón, por la diferencia de masa y, además, porque el átomo de hidrógeno sería inestable en tal caso.

La imagen del *positrón*, la antipartícula del electrón, como un hueco de carga eléctrica positiva que se desplaza en el mar presenta una cierta similitud con el concepto de portadores electrón-hueco de la corriente eléctrica en los materiales semiconductores, de amplia aplicación en electrónica. Sin embargo, los huecos en semiconductores no se consideran verdaderas partículas, sino una formulación cómoda para describir el complejo movimiento de los electrones en la banda de conducción del material.



Por el contrario, el positrón debe considerarse tan real como el electrón mismo, y no un artificio como el hueco en un semiconductor, y posee exactamente la misma masa y carga en valor absoluto pero con el signo cambiado. El positrón fue descubierto experimentalmente por Carl David Anderson en 1932, utilizando un detector puntero en aquel entonces, una cámara de niebla. Sin embargo, actualmente el mar de electrones negativos queda como un recurso gráfico e intuitivo para introducir la existencia de la antimateria, así como para ilustrar que el vacío puede significar lo inobservado, más que lo inexistente. El creativo físico estadounidense Richard Feynman reinterpretó al positrón como un electrón de energía negativa que se mueve hacia atrás en el tiempo.

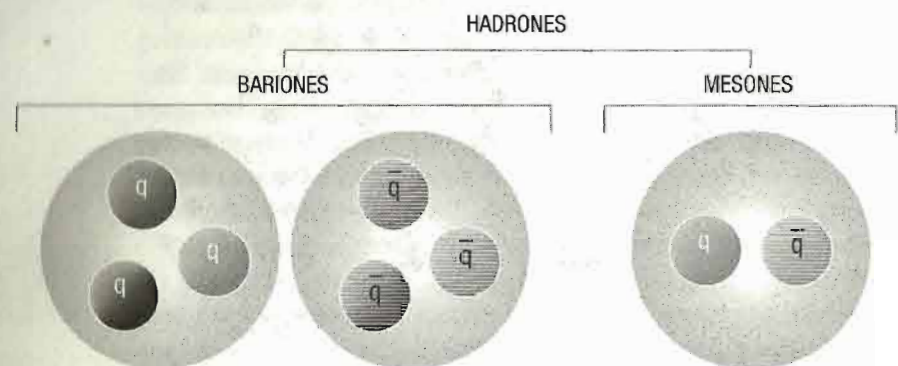
Cuando materia y antimateria se encuentran en un punto del espacio se aniquilan, emitiendo un par de fotones (dos rayos gamma), como consecuencia de la equivalencia entre masa y energía. Esta característica suele inflamar la imaginación popular, conjeturando un posible antimundo paralelo al nuestro hecho totalmente de antimateria. La realidad, sin dejar de ser

Interesante, es más prosaica: las antipartículas conviven con nosotros como partículas reales, aunque en una proporción ínfima. Hay isótopos radiactivos, naturales y artificiales, que emiten positrones (radiación beta). Una vez que un positrón se encuentra con un electrón de cualquier átomo cercano, se aniquilan mutuamente. Esta característica es el fundamento de la tomografía por emisión de positrones (PET, por sus siglas en inglés), técnica usada en medicina nuclear para el diagnóstico de tumores y de otras patologías.

También los antiquarks coexisten de manera más pacífica con los quarks en la materia ordinaria, aunque confinados dentro de protones y neutrones (figura 8). En verdad, las fluctuaciones cuánticas generan pares de quarks y antiquarks, y la visión de un protón compuesto por tres quarks es solo una primera aproximación a una realidad mucho más compleja y apasionante.

Protones y neutrones son los representantes más conocidos de la familia de los *bariones*, partículas constituidas por tres quarks. En el universo se observa un enorme exceso de bariones respecto a sus antipartículas, los antibariones. Se supone que en el Big Bang se formaron cantidades iguales de cada tipo, y este

FIG. 8

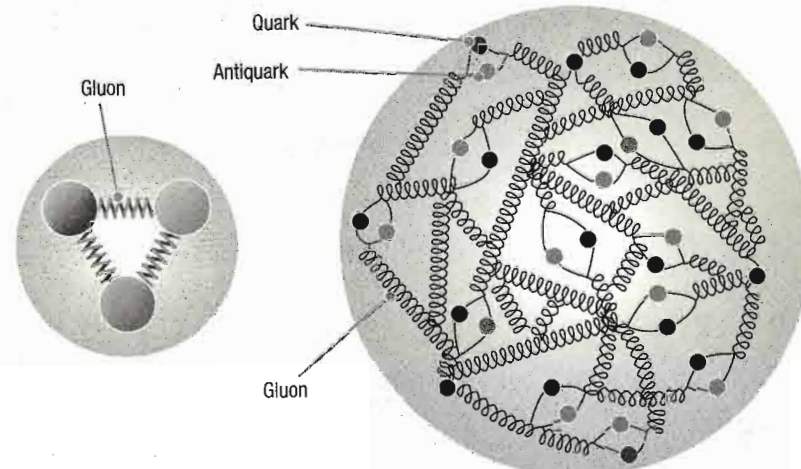


ANATOMÍA DE UN PROTÓN

Es habitual describir al protón como una partícula compuesta por tres quarks, dos *up* y un *down*. Sin embargo, tal descripción solo es correcta o bien en una primera aproximación, o bien al suponer que los quarks son constituyentes, es decir, no son elementales. Al utilizar sondas más energéticas —lo que equivale a explorar distancias más cortas en el interior del protón— aparece una estructura extraordinariamente más rica.

Lo simple no siempre es lo verdadero

La primera evidencia directa acerca de la existencia de los quarks tuvo lugar en experimentos de difusión de electrones por protones y neutrones, similares al experimento de Rutherford con partículas alfa sobre átomos. Por un lado, los gluones, el «pegamento» de los quarks, forman una parte consustancial del protón. Tanto es así que la masa del protón o del neutrón (alrededor de $1 \text{ GeV}/c^2$ en unidades habituales en física de partículas) se debe fundamentalmente a la energía aportada por los gluones en su interior, y no al mecanismo de Higgs, que dota de masa a quarks y electrones. Por otro lado, el «mar» de quarks y antiquarks cobra un protagonismo cada vez mayor a medida que se incrementa el poder de resolución de la sonda empleada. Ahora bien, si sumamos, en un instante dado, el número de todos los quarks y le restamos el número de todos los antiquarks, siempre se obtendrá un balance neto igual a tres: dos *up* y un *down*, como en el modelo simple.



En una primera aproximación, un protón puede considerarse compuesto de dos quarks *up* y uno *down*. La realidad es mucho más compleja, y si se examina con detalle está formado por un «mar» de quarks, antiquarks y gluones, cuyo número cambia según la energía de la sonda utilizada.

desequilibrio es uno de los principales problemas sin respuesta de la física de partículas y la cosmología, marcando uno de los límites del conocimiento científico actual.

VACÍO... ¡HAY MÁS DE UNO!

Tras la atrevida suposición de Dirac, aparentemente disponemos de dos tipos de vacío: por un lado, un estado carente de cualquier tipo de partículas, en particular de electrones y positrones; por otro, un vacío con un mar de infinitos electrones «ocultos». La creación de un par electrón-positrón se considera

como una creación «de la nada» en el primer caso, mientras que en el segundo se puede interpretar que el electrón ya existía pero no era observable, por tener energía negativa, hasta que emergió desde el mar de Dirac, dejando el hueco correspondiente. La energía y la carga eléctrica del vacío en el primer caso serían iguales a cero, pero ¡infinitas en el

Recuerdo que cuando alguien intentó explicarme los operadores de creación y destrucción de electrones, dije: «¿cómo se puede crear un electrón? Está en contra de la conservación de la carga».

RICHARD P. FEYNMAN

segundo! A simple vista ambos vacíos parecen muy diferentes, aunque en realidad, y desde el punto de vista operacional, no lo son tanto. Pero antes de proseguir formulemos la pregunta: ¿por qué es tan importante el vacío y qué papel juega en una teoría cuántica de campos?

Según la TCC, todo el espacio está ocupado por campos que representan una «potencialidad» para la creación y aniquilación de partículas y antipartículas, sean de materia o de radiación. Por tanto, para disponer de una descripción teórica completa, hay que conocer también qué es el vacío de la teoría, pues las partículas «aparecen» y «desaparecen» a partir de él, conforme a las grandes leyes de conservación, como la energía-momento lineal o la carga eléctrica.

También conviene resaltar que en la TCC lo que importa son las magnitudes finales observadas, que han de ser finitas, pero

pudiendo manejarse a lo largo del cálculo intermedio cantidades infinitas, que se cancelan mutuamente en algún momento. Este procedimiento, no exento de problemas epistemológicos, se conoce como *renormalización* y no es una cuestión fácil de abordar sin amplios conocimientos matemáticos y físicos. En el caso del vacío de Dirac y de un vacío sin ese mar de electrones ocultos, ciertamente existe una diferencia (¡infinita!) de energía entre ambos. Sin embargo, se puede añadir una constante infinita con el signo apropiado donde sea necesario y las conclusiones observacionales serían las mismas.

Así pues, el vacío de la teoría normalmente se corresponde con la ausencia neta de partículas en una región del espacio, pero esto no significa que se pueda identificar con la falta de cualquier actividad. Para entender esta sutileza hemos de acudir al principio de indeterminación de Heisenberg: no se puede conocer, simultáneamente y con precisión ilimitada, la posición y la velocidad —el momento lineal, para ser precisos— de una partícula. Algo equivalente sucede entre otras parejas de variables denominadas conjugadas, como la energía y el tiempo. Aplicando el principio de Heisenberg a la magnitud del campo y a su ritmo o velocidad de variación, hemos de admitir que en regiones muy pequeñas del espacio todos los campos, de materia o de interacción, se encuentran fluctuando de forma continua y anárquica.

En consecuencia, aunque en promedio no haya partículas en el espacio vacío, sí pueden producirse en un brevísimo lapso de tiempo (del orden de 10^{-24} s) pares partícula-antipartícula «virtuales». Por ejemplo, el vacío del campo electromagnético es un estado en el que no hay fotones reales, pero el campo fluctúa de modo espontáneo produciendo una densidad de energía del vacío, es decir, un efecto observable, aunque los fotones virtuales no lo sean directamente. No se trata de una cuestión metafísica, sino que la influencia de la densidad del vacío se ha observado y medido en el efecto Casimir y en el efecto Lamb. El primero consiste en una fuerza atractiva que aparece entre las placas de un condensador sin cargar; el segundo, en un desdoblamiento muy pequeño de ciertos niveles energéticos del átomo de hidrógeno

debido a la interacción del electrón del átomo con las fluctuaciones cuánticas del vacío.

Cada campo cuántico, de materia o fuerza, tiene su correspondiente estado de vacío, con sus características propias. Entonces hablaremos, por ejemplo, de un vacío asociado a la interacción electrodébil y de otro vacío asociado a la interacción fuerte. En este último caso, como los gluones interaccionan fuertemente entre ellos, el vacío resultante resulta muy peculiar, originando «condensados» de quarks y gluones cuyo estudio es muy importante para entender la interacción fuerte a bajas energías. Todos ellos contribuyen, en mayor o menor grado, a una densidad total de energía asociada al vacío físico. Por consiguiente, a escala microscópica el vacío cuántico es un lugar burbujeante, frenético y caótico; su relevancia cosmológica se hará evidente al abordar más adelante la inflación cósmica, la energía oscura y la expansión acelerada del universo.

Como consecuencia de tal complejidad, inesperada desde un punto de vista clásico pero no tanto desde el punto de vista cuántico, necesitaremos una definición de vacío lo más general posible. Así pues, lo definiremos como el estado con la menor energía posible. Observemos que esta caracterización coincide en general con el vacío asociado a los campos usuales de materia (electrones) e interacción (fotones), es decir, cuando partículas y radiación están ausentes.

Sin embargo, existen ciertos tipos de campos cuánticos cuyo vacío depara una complejidad que precisa de un análisis más detallado. Este es el caso del campo de Higgs, donde la configuración de energía más baja se corresponde con un estado tal que el campo no es nulo, sino que adquiere un valor constante en todo el espacio. Aunque la teoría y el vacío electrodébil son inicialmente invariantes con respecto a una simetría interna de tipo gauge, una vez que se produce el mecanismo de Higgs el vacío deja de serlo. En otras palabras, la ruptura espontánea de simetría tiene lugar cuando la naturaleza «elige» un determinado vacío, lo cual implica una cierta configuración del campo de Higgs en todo lugar y en todo instante. Esta condición produce cierto desasosiego entre más de un físico, por la exigen-

cia de que se extienda por todo el espacio, aunque cualquier otra elección también sea posible. Más aún, se ha especulado recientemente sobre la posibilidad de que el vacío resultante sea en realidad un estado metaestable, un «falso vacío» que no se corresponde con la mínima energía posible. Una transición al verdadero vacío —que liberaría una inimaginable cantidad de energía— pondría fin a nuestro universo en esta visión apocalíptica.

Dejando de lado estas especulaciones, es de justicia reconocer el gran éxito del mecanismo de Higgs dentro del modelo estándar, proporcionando masa a ciertos portadores de fuerza y partículas elementales como los bosones W y Z y, de manera más indirecta, a quarks y electrones; el fotón permanece sin masa. El descubrimiento en el LHC del bosón de Higgs confirmó la solidez del modelo estándar, que explica un sinnúmero de observaciones experimentales realizadas hasta la fecha.

UN BIG BANG «DE BOLSILLO» EN EL LABORATORIO

El LHC es sin duda la máquina más compleja que la humanidad ha construido y puesto en funcionamiento jamás. Se puede considerar como un potentísimo microscopio útil para examinar el interior de la materia ordinaria, así como para reproducir las condiciones que existían en el universo primitivo, a fin de poder estudiarlas mediante sofisticados detectores y potentes ordenadores.

¿Cómo es posible recrear, de manera controlada, las condiciones que imperaban en el universo una fracción de segundo tras el Big Bang, en un potente acelerador de partículas como el LHC? Posiblemente la primera idea es que no es posible. A fin de cuentas, estamos hablando de la génesis de, literalmente, todo, en una escala de energía inimaginable. Aunque en el LHC los protones antes de colisionar se muevan a velocidades cercanas a la de la luz, debido a su pequeña masa su energía cinética es equivalente a la de un mosquito en vuelo. ¿Cómo pueden dos mosquitos generar un Big Bang al colisionar? Hasta parece

ridículo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la variable importante es la densidad de energía, no la cantidad. Siendo los protones partículas del tamaño de un fermi (fm) con una energía de 7 TeV (teraelectronvoltios) cada uno, podemos calcular la densidad nominal de energía por colisión como:

$$2 \cdot 7 \text{ TeV/fm}^3 = 2 \cdot 10^{30} \text{ J/m}^3,$$

donde se ha considerado que: $1 \text{ TeV} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ J}$ y $1 \text{ fm}^3 = 10^{-45} \text{ m}^3$. En el caso de colisiones de iones pesados, la densidad de energía puede resultar incluso más elevada, ya que pueden interaccionar muchos protones y neutrones en cada colisión, del orden de un centenar, cada uno con una energía aproximada de 2 TeV. En resumen, la densidad de energía en las colisiones del LHC es extraordinariamente elevada, comparable a la que tenía el universo primigenio con una edad de un microsegundo, alcanzando temperaturas de billones de kelvin.

Al colisionar protones a energías tan altas, en los aceleradores se producen, entre otras, partículas no ordinarias que contienen quarks de tipo *strange*, *charm*, *bottom* y *top*, así como el bosón de Higgs, descubierto en 2012. Estas se desintegran en general muy rápidamente, dando lugar a partículas ordinarias como protones, piones, electrones o fotones, que dejan trazas y registros en los complejos detectores situados alrededor de los puntos de colisión del LHC (en la fotografía inferior de la página 83 se muestran este tipo de trazas en el colisionador estadounidense RHIC). En total pueden ser cientos de trazas por colisión, incluso miles en el caso de iones pesados. Mediante un elaborado tratamiento informático de la ingente cantidad de datos proporcionados por los detectores, se obtiene valiosa información acerca de los modos de producción, desintegración y vidas medias de esas partículas. A su vez, esa información permite entender mejor las interacciones que gobernaban el universo en evolución tras la inflación cósmica.

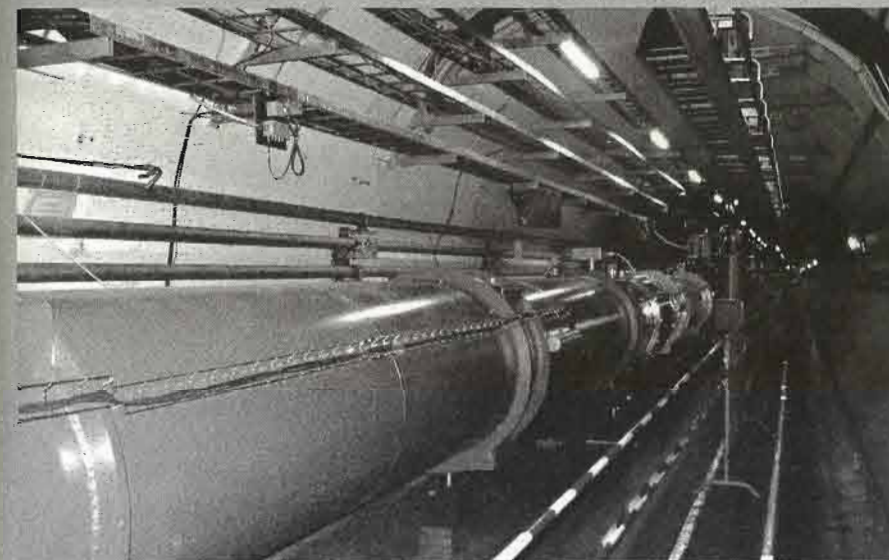
Por otro lado, las partículas no ordinarias producidas en el LHC o en otros aceleradores podrían actuar como auténticos «portales», conduciendo al descubrimiento de la llamada «nue-

LHC: LA MÁQUINA MÁS COMPLEJA JAMÁS CONSTRUIDA

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC, de *Large Hadron Collider*) es el mayor acelerador del mundo y está ubicado en un túnel de 27 km de circunferencia, a 100 m bajo tierra en promedio, cerca de la ciudad suiza de Ginebra. Su temperatura de funcionamiento es de 1,9 K, menos de dos kelvin por encima del cero absoluto, menor que la temperatura en el espacio exterior. Es, por tanto, el lugar extenso más frío de todo el universo conocido!

Explorando las fronteras de lo desconocido

En esta gran instalación científica, ingenieros y físicos del CERN hacen chocar entre sí partículas subatómicas, principalmente protones, pero también iones de plomo, mucho más pesados. Las partículas más pesadas, como el quark *top* o el bosón de Higgs, e incluso otras más allá del modelo estándar, se desintegran rápidamente en el interior del detector, generando partículas ordinarias que son detectadas finalmente. La masa y otras propiedades de estas partículas se pueden determinar, permitiendo reconstruir la desintegración inicial. Los choques se producen en puntos seleccionados donde se ubican grandes detectores: ATLAS, CMS, LHCb y ALICE. Estos registran las partículas resultantes de las colisiones para estudiar los elementos que componen la materia de la que está hecha el universo y sus interacciones. También se buscan posibles dimensiones adicionales, más allá de las tres espaciales que conocemos, predichas por la teoría de cuerdas.



Interior del túnel del LHC, en un punto situado poco antes del detector LHCb, especializado en el análisis de la producción y desintegración de partículas con quarks de tipo *bottom*.

va física», es decir, nuevos fenómenos, partículas o interacciones que no tienen cabida dentro del paradigma del modelo estándar. La nueva física constituye un territorio del conocimiento de la naturaleza todavía por descubrir y explorar, aunque ya hay evidencias de su existencia, como la materia oscura.

Plasma de quarks y gluones

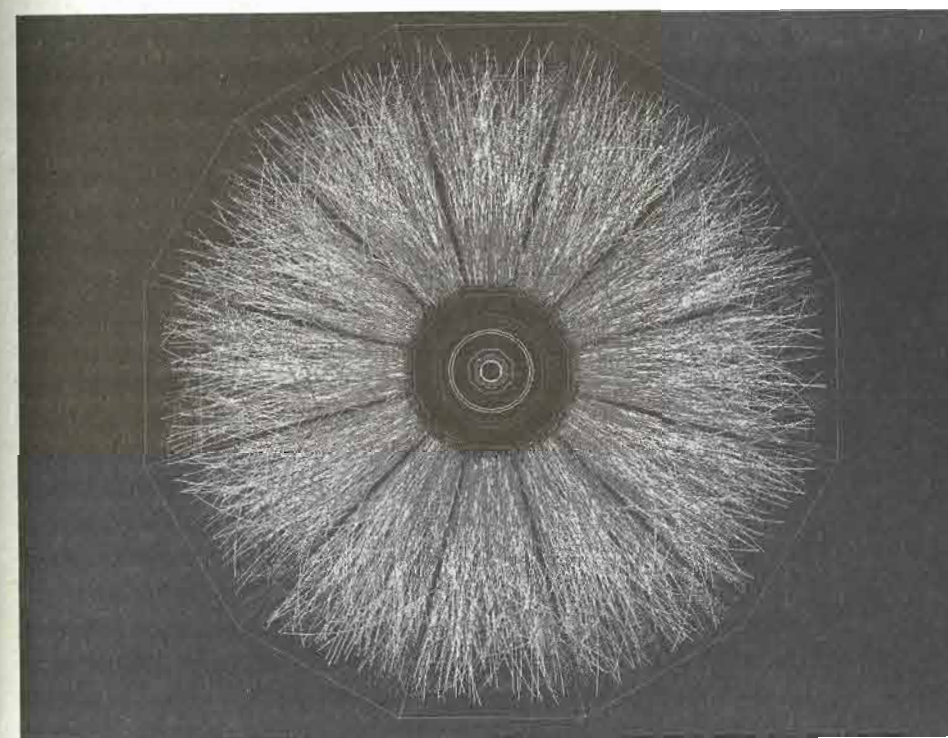
Cuando se cruzan haces de iones pesados en sentidos contrarios en un acelerador de partículas, las densidades y temperaturas alcanzadas en las colisiones pueden ser tan elevadas como para formarse un plasma de quarks y gluones. Tras unas primeras evidencias halladas en los aceleradores del CERN a lo largo de la década de 1990, el plasma se volvió a detectar en colisiones de núcleos de oro que tuvieron lugar en 2004 en el RHIC (Colisionador Relativista de Iones Pesados) del Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Estados Unidos.

Actualmente, el experimento ALICE, ubicado en uno de los puntos de colisión del LHC, está especialmente diseñado para estudiar ese estado extremo de la materia. En esta fase, con plasma extremadamente denso y con temperaturas de billones de kelvin, quarks y gluones no forman hadrones sino que se comportan como *cuasi libres* en un fluido (más líquido que gas) casi perfecto, es decir, prácticamente sin viscosidad, aunque no del todo. El estudio de sus propiedades facilita la comprensión tanto de la teoría de la interacción fuerte, la llamada cromodinámica cuántica, como la formación de la materia hadrónica en el universo primitivo, pues se cree que el plasma de quarks y gluones emergió en el universo entre los primeros veinte y treinta microsegundos tras la Gran Explosión.

La formación de las grandes estructuras del cosmos, como estrellas, galaxias y cúmulos, está indisolublemente ligada a la génesis de estructuras a escalas inferiores, regidas por las interacciones fundamentales, ilustrando la profunda relación que existe entre el microcosmos y el macrocosmos. Esa íntima relación se manifiesta de manera meridianamente clara en la emergencia de la vida.



A la izquierda, *Niñas en el mar* (1929), de Joaquín Sorolla, una pintura que ilustra la adquisición de masa de las partículas. El mar representa el campo de Higgs y las niñas, las partículas. Caminado dentro del agua la fricción es grande, la masa es elevada y la velocidad, baja. Caminando por la orilla no hay fricción, la masa es nula y la velocidad máxima. Debajo, reconstrucción en el plano transversal del haz de las trazas dejadas por las partículas producidas en una colisión en el RHIC (sigla inglesa de Colisionador Relativista de Iones Pesados), en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, Estados Unidos.



LA SINFONÍA DE LAS INTERACCIONES: ¡HÁGASE LA VIDA!

La vida, tal y como la conocemos, ha sido posible en nuestro universo gracias a un formidable cúmulo de circunstancias favorables que se han ido produciendo lentamente a través de una larga evolución, involucrando todas las interacciones conocidas, tanto la gravedad como las fuerzas del modelo estándar. Algunos han querido ver en ello un «diseño inteligente» —un eufemismo de un Dios creador— cuya finalidad es permitir la emergencia de vida inteligente, y en particular de la vida humana.

Una vez finalizada la inflación cósmica, que expandió el universo a un ritmo inimaginable en un brevísimo lapso de tiempo, la interacción electrodébil dotó de masa a los bosones intermedios, quarks y leptones. Por otro lado, gracias a la interacción fuerte, se pudieron constituir protones y neutrones a partir del plasma primigenio de quarks y gluones. Estos, a su vez, originaron los núcleos atómicos unos minutos tras el Big Bang. Los átomos se pudieron formar gracias a la interacción electromagnética, cuya intensidad era y es la justa para proporcionar estabilidad atómica y permitir la formación de moléculas.

Si la interacción fuerte hubiese sido un poco más o menos intensa de lo que es, no se habría producido carbono ni oxígeno en el interior de las estrellas, ambos elementos indispensables para la formación de materia orgánica. Una misma conclusión se alcanza si la interacción débil hubiese sido levemente mayor, acelerando el ritmo de desintegración de los neutrones, cuya vida media es de unos quince minutos, en protones, electrones y neutrinos. En tal caso, los neutrones hubieran sido mucho más escasos en la nucleosíntesis primordial del helio durante los primeros minutos del universo, y a más largo plazo, en la síntesis del carbono a partir del helio en las estrellas.

Por otro lado, la intensidad relativa de la fuerza electromagnética con respecto a la gravedad debe permanecer dentro de un estrecho margen. Si aumentara ligeramente, todas las estrellas habrían sido más grandes y masivas que nuestro Sol, lo que implica una veloz combustión estelar que conllevaría una vida breve e irregular, imposibilitando la aparición de vida compleja. Si fuera

ligeramente inferior, las estrellas serían mucho más pequeñas que el Sol y no serían capaces de sintetizar elementos pesados.

La aparición de la vida no solo está condicionada por las características de las interacciones, de las que hemos visto algunos ejemplos, sino también por la dimensionalidad del espacio. Para entender esto, hemos de aceptar que la vida compleja, como la conocemos, precisa de centenares de millones de años para aparecer y evolucionar en planetas con órbitas estables alrededor de estrellas. Pues bien, según la ley de la gravedad las órbitas elípticas estables solo son posibles en tres dimensiones; para cualquier otro número, pequeñas perturbaciones causadas por otros objetos celestes alterarían la órbita de un planeta, originando bien su colisión con la estrella, bien su expulsión fuera del sistema planetario. En cualquier caso, no sería posible una evolución lenta como la que ha sucedido en nuestro planeta.

La dimensionalidad del espacio también condiciona fuertemente la existencia misma de estrellas y átomos, las primeras regidas básicamente por la interacción gravitatoria y los segundos, por las fuerzas electromagnéticas. Así, en cuatro dimensiones en vez de tres, la ley de la inversa del cuadrado de la distancia se vería profundamente alterada, pues si duplicamos la distancia la fuerza disminuiría en un factor $1/8$, frente a $1/4$ como sucede en nuestro mundo. Por consiguiente, en un espacio con más de tres dimensiones el Sol no podría llegar a un estado estable, al no poder alcanzar un equilibrio entre la compresión gravitatoria y la presión de radiación. Por razones análogas, los átomos tampoco podrían existir como los conocemos.

Así pues, las leyes de la naturaleza de nuestro universo constituyen un sistema sumamente ajustado y ligeras variaciones de sus características tendrían efectos catastróficos para la aparición de la vida. El principio antrópico, que relaciona las características del universo con la existencia del ser humano y que analizaremos al final del libro, fue propuesto como una solución a este aparente «contubernio» de parámetros y leyes de la física, como una alternativa al Diseño Inteligente.

El origen del universo

Millones de años de evolución, marcados por una sucesión interminable de ciclos naturales, como el día y la noche o las estaciones, han modelado el cerebro de la especie humana. Cuando su capacidad intelectual llevó al ser humano a interrogarse sobre sí mismo, «¿de dónde venimos?» fue una pregunta inevitable.

El paradigma cosmológico actual supone que el origen del universo, y el comienzo del espacio y del tiempo, tuvieron lugar a partir de una gran explosión. Un gran número de observaciones astronómicas y astrofísicas pueden explicarse así de una manera elegante y simple, lo cual constituye un extraordinario logro científico. Sin embargo, en el «instante cero» del Big Bang debió existir una singularidad espaciotemporal. La teoría de la relatividad general, que la predice, pierde su validez justamente en ese instante, lo cual constituye, cuanto menos, un problema de consistencia.

Por ello, se considera que para entender mejor el propio Big Bang y las primeras etapas del universo primigenio, es preciso integrar los dos grandes paradigmas de la física del siglo xx en una misma teoría. Por un lado, la relatividad general, que controla «lo grande»; por otro, la mecánica cuántica, que rige el mundo de «lo pequeño», aunque a veces se extienda a escalas mayores. Durante un siglo ambas teorías se han considerado como irreconciliables, y aunque hoy en día existen propuestas para la formulación de una gravedad cuántica, el camino aún parece largo y las soluciones son controvertidas.

En este capítulo abordaremos los instantes posteriores al Big Bang, con especial énfasis en la inflación cósmica, que tan excelente acuerdo muestra con las observaciones, aunque no está libre de puntos oscuros ni es plenamente aceptada por toda la comunidad científica. Examinaremos también algunas de las alternativas al paradigma inflacionario e incluso al Big Bang convencional.

LOS PRIMEROS INSTANTES DEL BIG BANG

Para empezar, conviene resaltar la brevedad de esta época del universo en la que vamos a centrarnos, una fracción minúscula de segundo, que a su vez se subdivide en eras marcadas por transiciones de fase. Distinguiremos tres eras o épocas en el universo primigenio: la era de Planck, desde el «instante cero» hasta 10^{-44} s; la época de la Gran Unificación, de 10^{-44} a 10^{-36} s, y la era electrodébil, que se subdivide a su vez en dos etapas: la inflación cósmica, de 10^{-36} a 10^{-33} s, y el recalentamiento, hasta 10^{-12} s.

Una transición de fase que nos resulta familiar es el cambio de estado de agregación de la materia, por ejemplo, el hielo cuando se funde, o el agua líquida al entrar en ebullición. Las propiedades de la materia cambian de manera abrupta en cualquier transición o cambio de fase, alterando la simetría del estado inicial. De este modo, el gas es más simétrico que el líquido, el cual es más simétrico que el hielo. Ahora bien, los cambios de fase a los que nos vamos a referir durante las eras del universo primigenio, debidos a la disminución de temperatura con la expansión, no afectan al estado de agregación de la materia, que era más bien escasa, sino que son transiciones asociadas a rupturas de simetría de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza, que entonces formaban una única fuerza.

Resulta procedente concentrar nuestra atención sobre el instante cero entendido como el comienzo del universo y del tiempo. Dicho instante se corresponde con una *singularidad* cosmológica espaciotemporal. Para intentar explicar su significado antes hemos de revisar brevemente el concepto matemá-

tico de singularidad. Aun así, formular una definición adecuada, y no ambigua, de singularidad en relatividad general no es tarea fácil ni está exenta de dificultades epistemológicas, siendo todavía motivo de debate entre los especialistas.

Singularidad espaciotemporal en el instante cero

Supongamos que en una calculadora u ordenador utilizamos la función elemental definida como el inverso de un número real x : $1/x$. Al sustituir en la variable x valores cada vez más cercanos a cero (supongamos que siempre positivos) podríamos, idealmente al menos, obtener valores indefinidamente grandes como resultado de la función, dentro de los límites de la capacidad del procesador de la máquina.

Pero ¿qué sucede si directamente introducimos el valor $x = 0$ en la calculadora? La respuesta es que en la pantalla obtenemos ERROR, o su símbolo equivalente.

En matemáticas se dice en este caso que el límite de la función es infinito —para ser precisos, el límite por la derecha—, lo cual significa que el cociente puede hacerse tan grande como se quiera en un entorno del valor $x = 0$. En otras palabras, la función $1/x$ posee una singularidad en $x = 0$.

Ahora intentemos formarnos una idea intuitiva e informal de lo que es una singularidad en términos más físicos, imaginando un lugar infinitesimalmente pequeño e infinitamente denso. Para concretar, hablaremos de una singularidad gravitatoria o espaciotemporal en un punto del espacio en el que la curvatura del espacio-tiempo se hace infinita. Dicho de otra forma, se trata de un punto, y su entorno más cercano, donde espacio y tiempo se confunden, donde no se pueden evaluar magnitudes tales como volumen, distancia o curvatura. Ahora bien, si el propio lenguaje de la teoría, lo que se denomina formalismo, se

¿Qué estaba haciendo Dios antes de crear el universo? Estaba preparando el infierno para quienes hicieran esa pregunta.

STEPHEN HAWKING EN HISTORIA DEL TIEMPO

vuelve inaplicable en una singularidad, ¿cómo podemos plantear su existencia con términos que pierden su significado físico en ese límite?

La respuesta pasa por ampliar la teoría física subyacente. Concretamente, los efectos cuánticos han de ser incorporados

a la teoría de la relatividad general de modo que la teoría resultante vuelva a cobrar sentido físico y, por supuesto, proporcione la respuesta que buscamos, si existe, naturalmente. Esa teoría se denomina genéricamente

gravidad cuántica, y ha habido numerosos intentos por formularla, con éxitos solo parciales.

Si la hipótesis del Big Bang es cierta, como confirman múltiples observaciones, en un pasado remoto debió producirse una acumulación de materia de densidad inimaginable. Fueron los físicos Stephen Hawking y Roger Penrose quienes predijeron, en 1970, la existencia de tal singularidad espaciotemporal, como consecuencia inevitable de las ecuaciones de la relatividad general de Einstein.

El intento de entender el significado de la singularidad del Big Bang y el posible comienzo y final del tiempo está profundamente ligado al estudio de otras singularidades espaciotemporales. Además de la supuesta singularidad que originó nuestro universo, el colapso de estrellas muy masivas también puede originar agujeros negros, que contienen singularidades en su interior.

La era de Planck

La era de Planck abarca desde la singularidad inicial hasta el denominado tiempo de Planck, que es del orden de 10^{-44} segundos. Puede parecer (y lo es) un tiempo brevísimo y, sin embargo, marca la evolución del universo hasta el presente y también su destino final. Para poder abordar su estudio, precisamos de algunas herramientas básicas de mecánica cuántica.

Como decía el célebre físico danés Niels Bohr, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, quien no se sorprenda al estudiarla es que realmente no la ha entendido. Siendo el funcionamiento de nuestra mente esencialmente clásico, algunas de las paradojas cuánticas podrían parecer «cosas de magia».

Al abordar la realidad cuántica se deben dejar de lado algunas ideas aparentemente obvias —que podríamos llamar prejuicios— de la mentalidad clásica.

Así, por ejemplo, el principio de indeterminación de Heisenberg afirma

que ciertas parejas de magnitudes físicas, como la posición y la velocidad (el momento lineal, para ser precisos) de una partícula no pueden determinarse simultáneamente con un grado de precisión arbitrariamente alto. La esencia de la filosofía cuántica reside ahí, y no existe una equivalencia clásica. Si se conoce la posición de cierto objeto con gran exactitud, entonces su velocidad, y, en consecuencia, su energía, está muy indeterminada, independientemente de la tecnología que se utilice para la medición. No solo se trata de una barrera intrínseca que la propia naturaleza levanta limitando nuestras posibilidades de conocerla, sino que conlleva implicaciones dinámicas insospechadas. Así, veremos que las fluctuaciones inevitables de los campos cuánticos en el vacío —por ejemplo, la aparición espontánea y caótica de pares virtuales partícula-antipartícula que vimos en el capítulo anterior— tienen importantísimas consecuencias cosmológicas.

Por otro lado, en física suelen demarcarse dominios de validez de las teorías a la hora de aplicarlas al estudio de los fenómenos naturales. Por ejemplo, la física newtoniana se puede utilizar sin problema siempre y cuando los cuerpos involucrados se muevan a velocidades pequeñas comparadas con la velocidad de la luz. Si recapacitamos, la velocidad de la luz en el vacío, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, como constante universal, y en general la existencia de constantes universales en física, constituye un hecho asombroso, y extremadamente provechoso, que permite la distinción entre diferentes dominios en la física y sus aplicaciones.

Dios no juega a los dados con el universo.

ALBERT EINSTEIN

Dios no solo juega a los dados con el universo, sino que a veces los arroja donde no se pueden ver.

STEPHEN HAWKING

Así, la física de Newton se puede interpretar como un caso límite de la teoría de la relatividad especial de Einstein, más compleja y menos intuitiva pero de validez más amplia.

En la teoría cuántica, la naturaleza de nuevo parece brindar a las criaturas inteligentes que la pretenden entender otra constante universal que juega un papel equivalente a la velocidad de la luz en la relatividad especial de Einstein. Se trata de la constante de Planck: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js, cuyo valor es extremadamente pequeño comparado con las magnitudes de energía y tiempo que nos son habituales. De un modo semejante a la relatividad especial, es posible distinguir regímenes del mundo físico en los que se pueden ignorar los efectos cuánticos, como en nuestro mundo macroscópico habitual, frente a otros donde es totalmente imposible hacerlo, como el mundo atómico.

La teoría de la relatividad general pertenece al mundo macroscópico, podríamos decir, «por nacimiento». En efecto, Einstein extendió su teoría de la relatividad especial, inicialmente restringida a observadores inerciales, es decir, moviéndose con velocidades uniformes, para incluir observadores acelerados. Mediante el denominado principio de equivalencia, la teoría de la relatividad general relaciona la gravedad con los sistemas de referencia acelerados. Al conjugar genialmente gravedad y geometría, reinterpreta la interacción gravitatoria entre los cuerpos como consecuencia de la deformación del espacio-tiempo. Al explicar el movimiento de los astros, refinando la ley de la gravedad newtoniana, la relatividad general cae de pleno dentro del dominio del macrocosmos.

La teoría de la relatividad general y la mecánica cuántica funcionan extremadamente bien dentro de sus respectivos dominios, pero dejan de servir, tal y como están formuladas, en determinadas regiones extremas. Por su escala minúscula, cabe argumentar, con fundamento, que los efectos cuánticos dominaban el universo en su primera fase, la era de Planck. Al mismo tiempo, la energía estaba tan concentrada que la gravedad sería extraordinariamente elevada. Por consiguiente, la teoría de la relatividad general y la mecánica cuántica debieron «cohabitar» en los primeros instantes, sin poder distinguir regí-

menes ni dominios donde una prevaleciera sobre la otra. Esto sucede para distancias del orden de la longitud de Planck ($\ell_p = 10^{-36}$ m).

Uno de los problemas más profundos de la física teórica actual es conjugar la teoría de la relatividad general, que describe la gravitación y, por tanto, el macrocosmos, con la mecánica cuántica, que describe las otras tres fuerzas fundamentales del modelo estándar. Ahora bien, la escala de energía necesaria para que la gravedad cuántica se manifieste experimentalmente está, sin duda, fuera del alcance de cualquier acelerador actual, incluido el LHC y sus futuras ampliaciones por muchas generaciones. Pero siempre nos quedará «el gran laboratorio del universo», donde podemos buscar señales «fósiles» de aquella etapa primigenia, cuando las energías extremas dominaban el mundo.

Mientras se confía en encontrar definitivamente una teoría de la gravedad cuántica empíricamente confirmada, poco se sabe aún de la era de Planck. Ciertamente, existen teorías candidatas para una gravedad cuántica, destacando entre ellas la teoría de cuerdas, que opta además a convertirse en la «teoría del todo» que explique las cuatro interacciones fundamentales... y todo lo demás. También cabe citar, aunque a un nivel mucho menos elaborado todavía, la gravedad cuántica de lazos (o de bucles). Ambas proponen cosmologías alternativas al paradigma establecido, pero todavía resultan altamente especulativas.

Mediante argumentos muy generales, sí podemos deducir que a medida que el universo se enfriaba rápidamente, las interacciones unificadas en la era de Planck comienzan a diferenciarse (figura 1). La gravedad fue la primera, convirtiéndose en mucho más débil y con sus características propias: no solo afecta al movimiento de los cuerpos, como las otras fuerzas, sino que distorsiona la geometría del espacio-tiempo a su alrededor, tal y como muestra la relatividad general de Einstein aun siendo una teoría clásica, esto es, no cuántica. Después de la gravedad se diferenció la interacción fuerte, hacia el final de la época de la Gran Unificación y el comienzo de la inflación. Por último, la interacción débil y el electromagnetismo se diferenciaron al finalizar la inflación.

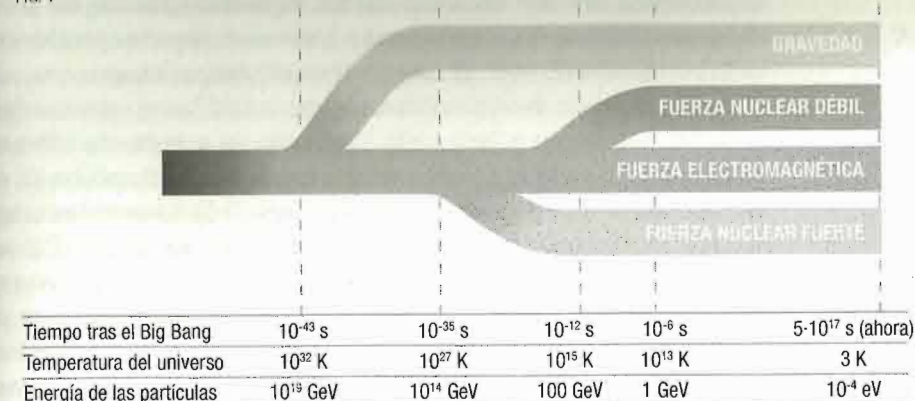
LA ERA DE LA GRAN UNIFICACIÓN

Tras la era de Planck las interacciones fuerte, electromagnética y débil continuaron unificadas como una sola fuerza durante un brevísimo periodo de tiempo. Desde el punto de vista de la física de partículas, Howard Georgi y Sheldon Glashow propusieron, en 1974, la unificación de las tres fuerzas citadas dentro de un formalismo común. Si las fuerzas débil y electromagnética se habían conseguido describir conjuntamente mediante la llamada teoría electrodébil, el siguiente paso fue concebir una simetría gauge más general que pudiera acomodar también a la interacción fuerte junto con las otras. De ahí el nombre de teoría de Gran Unificación (conocida por el acrónimo GUT, por sus siglas en inglés) y que da nombre a esta era del universo primigenio. En realidad, la GUT engloba una familia de teorías cuya simetría fundamental se ha ido complicando a partir de la idea original para superar las cada vez más rigurosas restricciones experimentales.

Una característica extremadamente interesante de la GUT es que, a medida que crece la energía involucrada en los procesos entre partículas, disminuye la diferencia en intensidad entre las diversas fuerzas, pudiendo finalmente, en una ampliación del modelo estándar, llegar a converger y convertirse en una única fuerza (figura 2). Esto convierte a esta teoría unificadora en una firme candidata para explicar cómo era el universo para energías cercanas a 10^{16} GeV, tan solo unos pocos órdenes de magnitud por debajo de la escala de Planck.

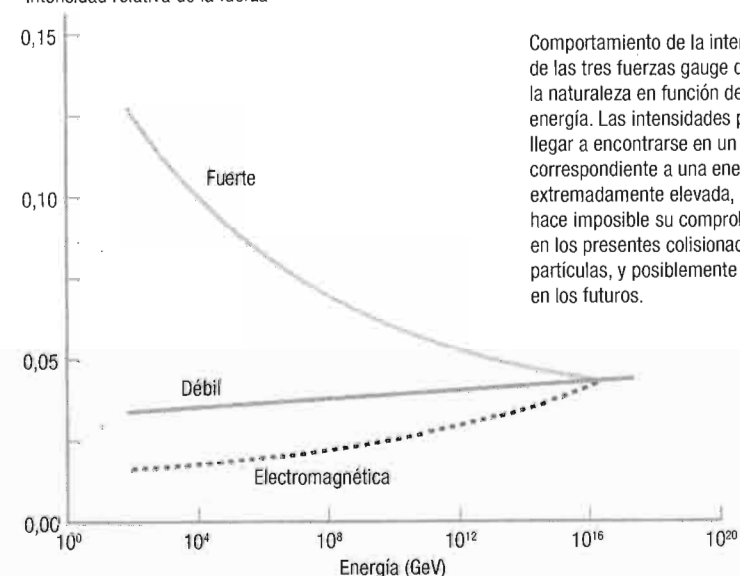
Una de las predicciones más espectaculares de la mayoría de teorías de gran unificación es que en esas condiciones los protones no serían estables, pudiéndose desintegrar, aunque con una probabilidad extremadamente pequeña. La predicción de la GUT de Georgi y Glashow para la vida media del protón era del orden de 10^{31} años, bastante mayor que la edad del universo. A pesar de eso, en condiciones experimentales controladas para evitar señales espurias y con un sistema de detección lo suficientemente sensible, sería posible registrar tales desintegraciones. A medida que se han realizado experimentos y refinado los cálculos teóricos, la vida estimada del protón según

FIG. 1



Se supone que durante la era de Planck las tres fuerzas del modelo estándar estaban unificadas con la gravedad en una única superfuerza representada por el tronco común en la imagen. A medida que se enfriaba el universo las distintas interacciones se fueron diferenciando, en sucesivas transiciones de fase, adquiriendo sus características propias.

FIG. 2 Intensidad relativa de la fuerza



Comportamiento de la intensidad de las tres fuerzas gauge de la naturaleza en función de la energía. Las intensidades pueden llegar a encontrarse en un punto correspondiente a una energía extremadamente elevada, lo que hace imposible su comprobación en los presentes colisionadores de partículas, y posiblemente también en los futuros.

las teorías de gran unificación ha ido aumentando hasta valores de al menos 10^{34} - 10^{36} años. De hecho, la desintegración del protón nunca ha sido detectada pese a haberse buscado con ahínco en laboratorios de todo el mundo durante largo tiempo.

Desde el punto de vista cosmológico, la GUT proporciona dos noticias, una buena y una mala. La buena es que puede ofrecer una explicación al exceso de materia frente a la antimateria en el universo. La mala es que predice la formación de monopolos magnéticos, el equivalente magnético a las cargas eléctricas. El problema es que ningún experimento ha detectado, por el momento, monopolos magnéticos —exceptuando uno presentado por el físico español Blas Cabrera mientras trabajaba en la universidad de Stanford en 1982, que no pudo confirmarse después—, pese a que deberían haberse producido en grandes cantidades durante la era de la Gran Unificación. No obstante, la comunidad científica no ha tirado la toalla y así, el experimento MoEDAL (*Monopole and Exotics Detector at the LHC*) en el CERN busca partículas exóticas altamente ionizantes, como el monopolo magnético.

Una vez que la temperatura del universo decreció lo suficiente, la interacción fuerte se diferenció de la electrodébil (figura 1) rompiendo la simetría GUT de unificación de las tres fuerzas y marcando el inicio de la inflación cósmica. La inflación proporcionaría una explicación sencilla a la falta de detección de monopolos magnéticos, pues la densidad de estos habría disminuido «diluyéndose» durante la fase de expansión exponencial del universo. En nuestro universo actual su densidad sería tan baja como para hacerlos prácticamente indetectables.

INFLACIÓN CÓSMICA Y RECALENTAMIENTO

La inflación cósmica propone una expansión exponencial del universo primitivo, experimentada durante un minúsculo intervalo de tiempo: entre 10^{-36} y 10^{-33} segundos tras el Big Bang. El paradigma inflacionario contiene un conjunto de modelos teóricos con distintos supuestos e implicaciones sobre la evolución del universo.

Como ya adelantamos en el primer capítulo, la inflación cósmica se postula para explicar una serie de observaciones astronómicas que, a primera vista, pueden parecer paradójicas, pues requieren unas condiciones iniciales de nuestro universo muy especiales y, por tanto, poco probables. Básicamente son dos: el problema del horizonte y la planitud del universo.

El primer problema lo plantea la homogeneidad e isotropía del universo actual, algo inesperado en una evolución «tranquila» tras un Big Bang caliente, violento e irregular. El segundo se debe a que la curvatura del espacio-tiempo actual es, en promedio, prácticamente nula, correspondiente a una geometría plana. En una evolución convencional tras la Gran Explosión, se requerirían unas condiciones iniciales extremadamente especiales para acabar con un universo plano, siendo cualquier otra opción mucho más probable.

La teoría de la inflación cósmica fue propuesta en la década de 1980 por Alan Guth para resolver esos problemas. La idea original de Guth fue que el universo comenzó a partir del Big Bang en un estado tal que las fuerzas fuerte, electromagnética y débil estaban unificadas, pues la simetría de la Gran Unificación no se habría roto. El mecanismo de Higgs tampoco sería operativo y las partículas elementales aún no habrían adquirido masa, moviéndose a la velocidad de la luz como los fotones.

Guth sugirió que hubo una brusca transición de fase a una escala gigantesca, que desencadenó un crecimiento vertiginoso del universo primigenio. De igual modo que se puede sobreenfriar el agua por debajo del punto de congelación sin que se forme hielo durante un tiempo, el universo podría comportarse de una manera análoga: la temperatura podría permanecer por debajo del valor crítico sin que la simetría unificadora entre las interacciones se rompiera. Por otro lado, sabemos que la transición de fase en el agua sucede de manera brusca, formándose cristales de hielo a lo largo del volumen de agua sobreenfriada, y algo semejante podría haber ocurrido en el universo primitivo.

¿Cuál es el equivalente del agua sobreenfriada en la analogía inspiradora de Guth? Pues bien, se trata del vacío, pero no del vacío correspondiente al mínimo de energía, sino de un falso

vacío como el que vimos con el bosón de Higgs y el potencial representado por el sombrero mexicano, es decir, un estado correspondiente a un mínimo relativo de energía potencial que no se corresponde con el verdadero estado de vacío. De hecho, inicialmente se pensó en el campo de Higgs, predicho teóricamente muchos años antes de su descubrimiento experimental, como candidato para hinchar el universo. El estado de falso vacío podía decaer hasta alcanzar el verdadero vacío, con una energía potencial menor, mediante un proceso cuántico denominado *efecto túnel*.

El universo se encontraba entonces en un estado *metaestable*, como el agua sobreenfriada, con más energía que con la simetría rota. Esa energía adicional se encontraría almacenada en forma del falso vacío de un «condensado» de los campos cuánticos activos en aquella época. Lo más interesante es que tal falso vacío debió ejercer un efecto repulsivo semejante a la constante cosmológica introducida por Einstein para justificar un universo estacionario, pero mucho más poderoso, generando así la velozísima inflación.

Sin embargo, el modelo inflacionario de Guth adolecía de graves inconvenientes a la hora de reproducir el universo observado actualmente. En efecto, Guth suponía que la transición de fase ocurría de forma rápida, tal y como aparecen los cristales de hielo en el agua muy fría en la analogía. El falso vacío decaería rápidamente al vacío verdadero, de menor energía potencial, mediante efecto túnel con el universo aún atrapado en ese estado metaestable y, por tanto, en plena expansión inflacionaria. Allí donde se produjera la transición entre los dos vacíos, se originaría una «burbuja» de energía, donde la simetría entre las interacciones estaría rota. Ahora bien, para poblar el universo con radiación y materia se precisa de la energía cinética almacenada en las fronteras de tales burbujas (*bubble walls*), que debían colisionar unas con otras hasta formar un único universo con la nueva fase de simetría GUT rota y alcanzando el vacío verdadero en todas partes. Sin embargo, la expansión inflacionaria del universo era tan extraordinaria, que aun cuando las burbujas crecieran a la velocidad de la luz, se estarían separando unas de otras y no podrían

llegar a colisionar y juntarse. El universo resultante sería entonces muy poco uniforme, con regiones —fuera de las antiguas burbujas— donde la simetría GUT no estaría rota todavía; en suma, muy diferente del universo tal y como se observa desde la Tierra.

Para superar este problema, pocos años después el cosmólogo ruso Andréi Linde planteó un nuevo modelo inflacionario, propuesto también de manera independiente por Paul Steinhardt y Andreas Albrecht, en el que la inflación tenía lugar más lentamente (por supuesto estamos hablando de minúsculas fracciones de segundo). En este modelo, en vez de un túnel cuántico desde un estado de falso vacío, la inflación ocurrió mediante un campo cuántico, el *inflatón*, que se desliza más lentamente hacia abajo de una montaña de energía potencial. Este campo no tiene nada que ver con ningún campo conocido del modelo estándar. Este tipo de modelos se conocen como nueva inflación, frente al primer modelo de Guth, que se denomina antigua inflación.

El campo del inflatón

Podemos preguntarnos por la causa de la inflación, si no se trató de una brusca transición de fase del falso vacío como inicialmente propuso Guth. Para explicarlo evitando los problemas del antiguo modelo inflacionario, Linde postuló la existencia *ad hoc* de un nuevo campo llamado inflatón, cuya misión era inflar el universo primitivo a un ritmo exponencial, pero tal que la transición del inflatón desde el falso vacío al verdadero transcurría de un modo más lento. Este tipo de modelos inflacionarios se conocen como *de rodadura lenta*. A medida que transcurría la expansión, la energía del vacío decrecía suavemente, hasta que el proceso inflacionario cesó por completo, cediendo el paso a una expansión a ritmo más moderado.

La teoría inflacionaria explica el origen de la materia y la radiación que hoy existen en el universo: proceden de la misma densidad de energía que causó la inflación, que a su vez se nutre de la energía inicial del Big Bang. El periodo inflacionario propiamente dicho llegó a su fin cuando el inflatón adquirió suficiente energía cinética como para dejar de cumplir las condiciones de rodadura lenta supuestas

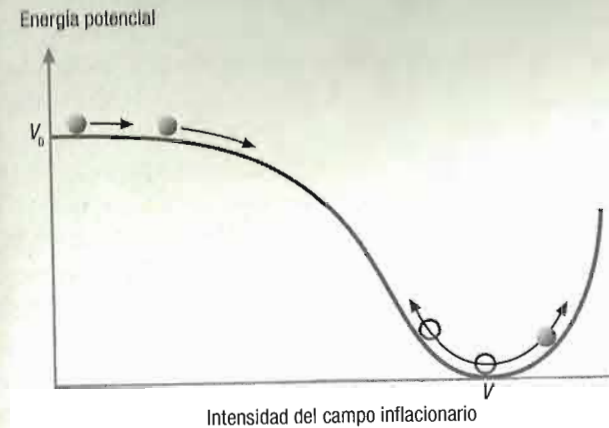
en este modelo. Seguidamente, esa energía cinética se transformó en radiación y materia mediante oscilaciones alrededor del mínimo de energía que representa el verdadero vacío. Este proceso se conoce como *recalentamiento*, aunque estrictamente hablando no haya evidencias directas de que hubiese estado caliente antes.

Durante la inflación se supone que la temperatura del universo cayó vertiginosamente. En el periodo de recalentamiento posterior, el universo se llenó de radiación electromagnética y materia gracias a la energía suministrada por el inflatón oscilando alrededor del vacío final. Se inició la llamada era de la radiación, pues incluso las partículas se movían a velocidades próximas a la de la luz. Partículas y antipartículas se aniquilaron y, por alguna razón que aún no se comprende bien —los modelos GUT podrían explicarlo— hubo un superávit de quarks y electrones al final de esta etapa, y por ello la materia supera a la antimateria en nuestro universo conocido. También la materia oscura surgió durante el recalentamiento, y es cinco veces más abundante que la materia ordinaria, aproximadamente. Con el enfriamiento posterior, la materia —ya no relativista— se convirtió en dominante unos diez mil años después del Big Bang. Actualmente vivimos en una era dominada por la energía oscura.

Podemos visualizar todo el proceso mediante la analogía de la figura 3. La bolita representa al inflatón que «busca» el mínimo de energía potencial. Se supone que este principio básico de la física rige universalmente y en todo momento, lo cual no deja de ser una hipótesis. El inflatón parte de una meseta, que representa un estado de gran densidad de energía del falso vacío y causa la inflación, rodando «con fricción» (causada como reacción por la expansión del universo) por una pendiente hasta alcanzar el valle. Una vez ahí, y mediante oscilaciones alrededor del mínimo de energía potencial, la energía cinética del inflatón se convirtió en radiación. Por otro lado, la temperatura habría descendido lo suficiente como para que la ruptura de simetría pudiera tener lugar, de modo que las interacciones débil y electromagnética se diferenciaron, y así han seguido hasta nuestros días.

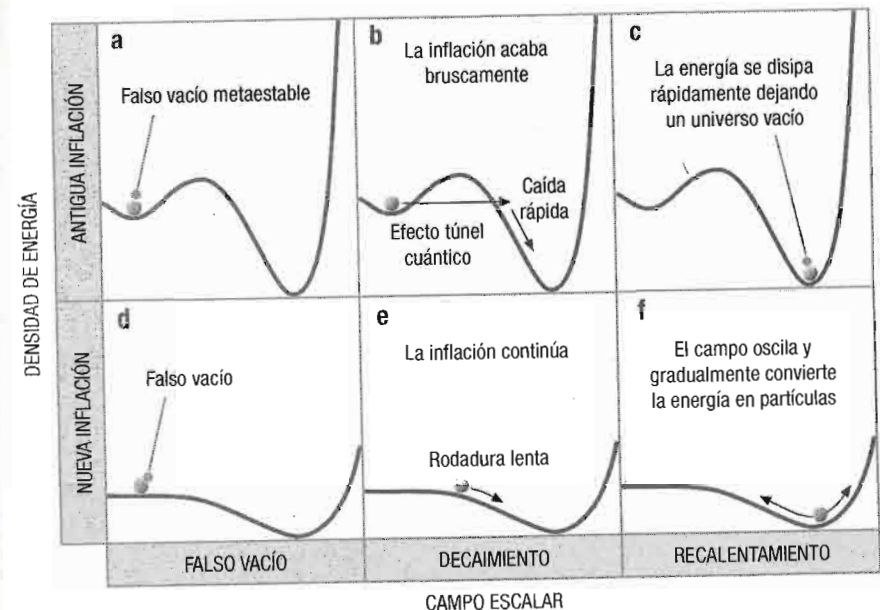
En la figura 4 se emplea el mismo esquema básico para comparar los dos tipos de modelos inflacionarios.

FIG. 3



Perfil típico de la energía potencial del campo del inflatón en función de su intensidad. La meseta inicial representa un estado metaestable del vacío que decae al verdadero vacío. Durante la fase de meseta tiene lugar el crecimiento extraordinario del espacio. En el valle tiene lugar el recalentamiento (representado por las oscilaciones), que puebla el universo de radiación y de materia.

FIG. 4

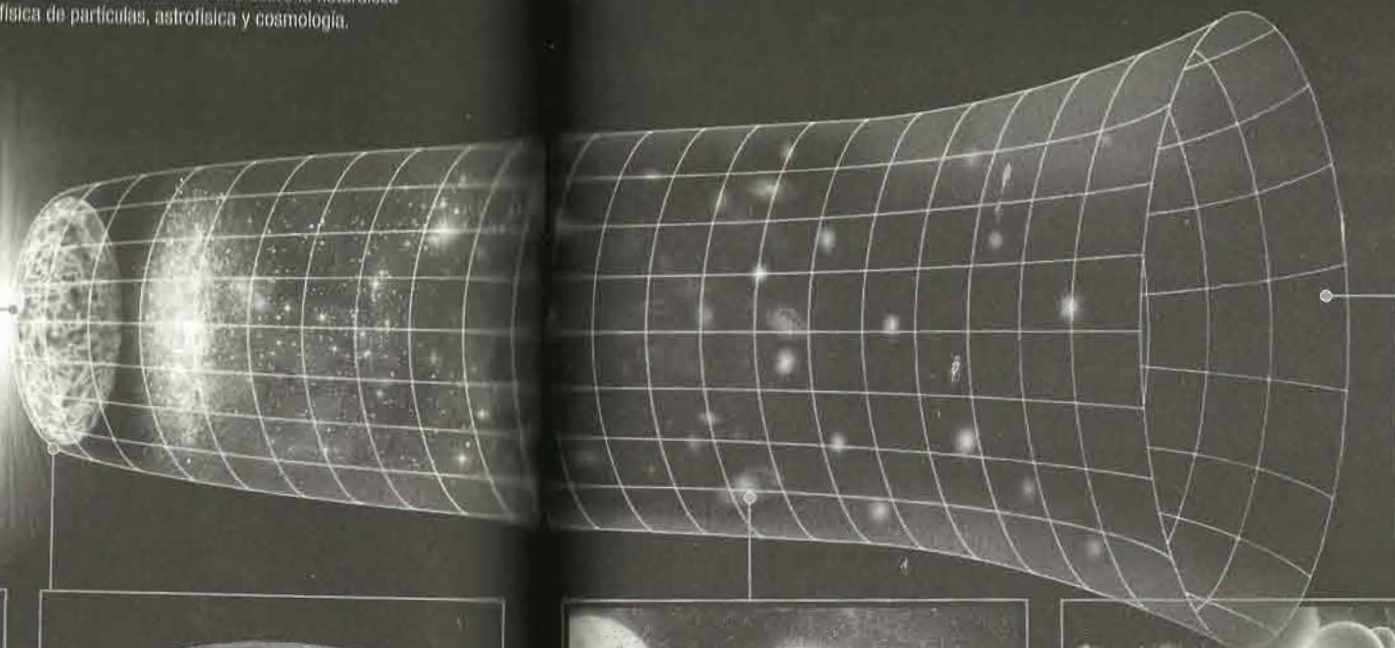


En la antigua inflación la transición del falso vacío al verdadero tiene lugar «demasiado rápido» por efecto túnel, lo que conduce a problemas de homogeneidad del universo. En la nueva inflación la transición es mucho más lenta (rodadura lenta) y el recalentamiento del universo tiene lugar una vez que ha concluido la inflación, conduciendo a un universo más homogéneo.

EN BUSCA DE LO DESCONOCIDO

Las grandes cuestiones científicas y filosóficas de la historia del conocimiento humano sobre la naturaleza van enriqueciéndose a la luz de los últimos avances en física de partículas, astrofísica y cosmología.

¿Existió una singularidad en el Big Bang que creó el universo de la nada? ¿Qué hubo antes del Big Bang, si lo hubo? ¿Cómo terminará nuestro universo? ¿Habitamos quizá un universo «isla» dentro de un océano de infinitos universos? ¿Tienen la física y la cosmología alguna respuesta a estas preguntas, o nunca podremos estar seguros?



El origen del universo

Tras el Big Bang, el universo sufrió una expansión exponencial llamada inflación. Después se formó un plasma que al enfriarse originó la materia y radiación actuales. El colisionador LHC reproduce las condiciones de ese universo primitivo para aproximarnos al límite de conocimiento del comienzo del universo.



Una instantánea del universo primitivo

El fondo cósmico de microondas es una imagen del universo «adolescente», 380 000 años tras el Big Bang. La nueva astronomía de multimensajeros, utilizando neutrinos y ondas gravitatorias, podría hacer retroceder el horizonte del conocimiento del universo más atrás en el tiempo.



Evolución hasta el presente

La materia dispersa se condensó formando las estrellas primitivas. Al explotar, sus elementos químicos se dispersaron, participando en la generación de nuevas estrellas y planetas. Al menos en uno, la Tierra, surgió la vida. ¿Fue fruto de la casualidad? ¿O quizá la hipótesis del multiverso podría explicarlo?



Destino final del universo

La energía oscura puede acelerar el universo hasta un ocaso violento donde espacio y tiempo desaparezcan. Según otras hipótesis, nuevos universos con nuevas leyes físicas podrían ir apareciendo, como burbujas, aunque nunca sabremos de su existencia. ¿Hemos llegado a la frontera última del conocimiento?

El paradigma de la inflación ha cosechado resonantes éxitos en sus predicciones una vez confrontadas con las observaciones astronómicas y astrofísicas. El crecimiento exponencial del espacio suaviza las irregularidades iniciales del universo primigenio al igual que una sábana se alisa al estirla, lo que explica la homogeneidad y planitud del universo actual.

Por otro lado, las pequeñas irregularidades que quedaron tras el periodo inflacionario, atribuidas a fluctuaciones aleatorias del campo del inflatón, se observan hoy en día en las heterogeneidades del fondo cósmico de microondas (FCM) (las variaciones relativas de densidad son del orden de una parte entre cien mil, un 0,001%) y en la arquitectura del cosmos a gran escala. Y la concordancia no solo es cualitativa, sino también cuantitativa. Si la teoría inflacionaria es cierta, las variaciones de la densidad deben ser aproximadamente invariantes de escala (pequeño frente a grande), como efectivamente se comprueba a partir del espectro de potencia del FCM y de las distribuciones de galaxias, sobre todo gracias a las observaciones del *Sloan Digital Sky Survey*, un ambicioso proyecto que emplea telescopios muy específicos con el fin de elaborar el mayor y mejor mapa celeste de la historia. Es este un gran éxito del paradigma inflacionario, y cualquier alternativa seria ha de presentar una explicación equivalente.

Sin embargo, tras esos grandes logros se esconde un problema que puede pasar inadvertido, pues aparentemente el número de parámetros de los modelos inflacionarios es reducido y, además, están libres del «ajuste fino». El ajuste fino de una teoría física supone tener que tomar muchos decimales en los parámetros del modelo para conseguir un buen acuerdo con los datos observados, lo cual resulta antinatural y sugiere una casualidad altamente improbable. Pongamos como ejemplo, fuera de la física, el balance de cuentas de una empresa o de un banco. Si las distintas partidas en la contabilidad tuvieran que llegar hasta la millonésima de euro para conseguir cuadrar las cuentas, sería algo bastante sospechoso.

Ahora bien, para entender dónde está el problema señalemos, en primer lugar, que los detalles de la inflación dependen crucialmente del tipo de potencial del vacío del inflatón, es decir, de la forma de la meseta, pendiente y valle que veíamos en la figura 3. Cada forma posible del perfil del potencial conduce a un patrón diferente en las heterogeneidades y anisotropías al acabar el periodo inflacionario, que más tarde dan lugar a la formación de las primeras galaxias. Por tanto, se dispone de muchos potenciales candidatos para la inflación, cada uno de los cuales conduce a un universo distinto. De hecho, uno de los fundadores de la cosmología inflacionaria, Paul J. Steinhardt, se ha convertido en uno de sus críticos más severos. Según sus estimaciones, si las condiciones iniciales de la inflación fueran aleatorias, una inflación «mala», de la que emergería un universo en contradicción con las observaciones, sería mucho más probable que una inflación «buena», que reproduciría nuestro universo actual. Es más, la ausencia de inflación sería incluso más probable que ambas.

Por otro lado, es opinión común entre los expertos que la detección de ondas gravitatorias primordiales sería una evidencia definitiva del paradigma inflacionario. La inflación predice dos tipos de ondas gravitatorias: uno, emitido durante el periodo inflacionario propiamente dicho —el extraordinario estiramiento del espacio—, y otro posterior debido a la violenta conversión de la energía inflacionaria en radiación y materia en el proceso de recalentamiento. Aunque las ondas gravitatorias del primer tipo no serían directamente observables, al haberse disipado en las primeras etapas del universo primitivo, habrían dejado su impronta en el FCM. En 2014, el experimento BICEP2 anunció la observación de ciertos rasgos en la polarización de los fotones del FCM que parecían confirmar la existencia de tales ondas. Desgraciadamente, una vez sustraído el efecto debido al polvo intergaláctico la presunta evidencia se desvaneció.

Con respecto a las ondas generadas durante el recalentamiento, su amplitud sería mucho mayor, en realidad, enorme (del orden de una millonésima de toda la energía liberada en esa época, según estimaciones teóricas), lo que en principio permitiría su detección. Sin embargo, su espectro de frecuencias excedería el

umbral de sensibilidad de los actuales detectores de ondas gravitatorias, por lo que resultarían imposibles de detectar. No obstante, ciertos modelos inflacionarios de baja energía, como ha propuesto originalmente el cosmólogo español Juan García-Bellido, predicen un fondo de ondas gravitatorias con señales de menor frecuencia, que quizá sí podrían caer dentro del intervalo de detección de futuros observatorios situados en satélites.

En resumen, si algún proceso inflacionario tuvo realmente lugar en la primera fase del universo, sus huellas habrían quedado codificadas en la radiación gravitatoria primordial. Su detección permitiría confirmar la existencia de la inflación cósmica, así como discernir entre distintos modelos inflacionarios, e incluso arrojaría luz sobre la física de partículas que regía en aquellos primeros instantes del universo. Constituye, pues, otro de los límites del universo conocido que vamos poniendo de manifiesto a lo largo de este libro.

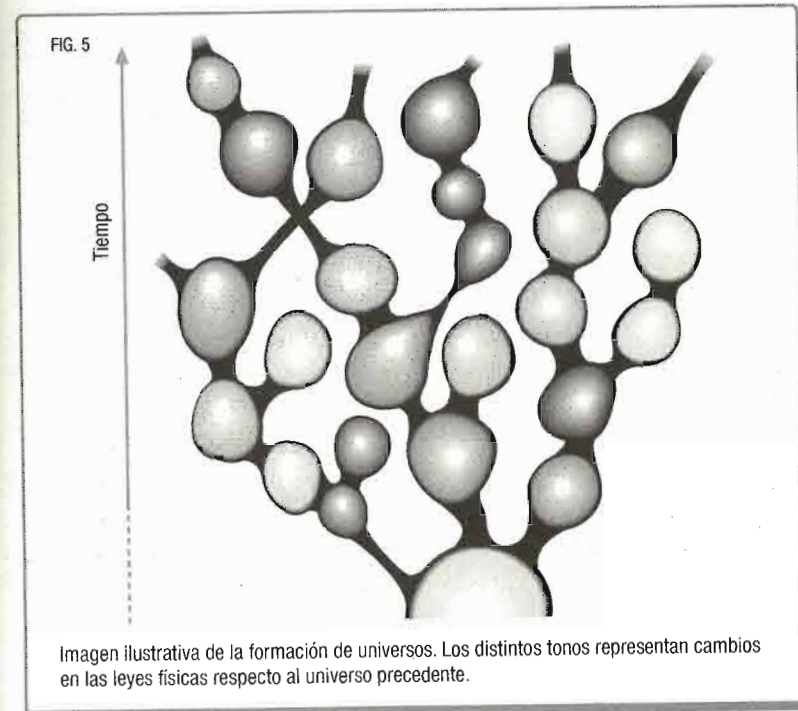
Inflación eterna

Dijimos que el origen de las irregularidades del fondo cósmico de microondas se encuentra en las leyes de la mecánica cuántica: un campo cuántico, como el inflacionario, nunca puede tomar el mismo valor en todos los puntos del espacio, sino que fluctúa aleatoriamente. Por esa razón, el periodo inflacionario ha de terminar en momentos ligeramente distintos en diferentes regiones del espacio, dando lugar así a las pequeñas variaciones de temperatura observadas en el FCM.

Podemos plantearnos qué sucedería si las fluctuaciones cuánticas del campo inflacionario no fueran tan pequeñas. Ciertamente, la probabilidad de que sucedan es extremadamente pequeña, y se podría pensar en ignorarlas. Sin embargo, esto no es posible porque las consecuencias son catastróficas.

En un entorno donde la fluctuación cuántica sea mayor de lo esperado, la inflación continuará y el espacio seguirá expandiéndose a un ritmo descomunal, mientras que en las regiones vecinas la expansión se habrá detenido. Surge así una burbuja de

energía y materia que se expande creando un universo propio e independiente. Este proceso puede repetirse indefinida y aleatoriamente en lo que se conoce como inflación eterna, y es común a la práctica totalidad de modelos inflacionarios actuales. La inflación eterna supone que existe una probabilidad muy pequeña, pero no nula, de que un proceso cuántico aleatorio desencadene la formación de un nuevo universo. Los nuevos universos, en continua génesis y evolución, se llaman universos burbuja, universos isla o universos de bolsillo, términos utilizados por diferentes autores pero con idéntico significado físico. Fuera de nuestro universo, la expansión inflacionaria separa unas burbujas de otras, creando espacio adicional de modo que se pueden formar nuevos universos burbuja, siendo el nuestro uno entre dicha infinidad (figura 5). Llegamos así al concepto de *multiverso* ligado a la inflación eterna.



En verdad, la concepción de una multitud de universos no es nueva en la física. Hugh Everett III propuso en la década de 1950 una interpretación heterodoxa de la mecánica cuántica para resolver algunas dificultades de interpretación del proceso de medida. La interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica, conocida como interpretación de Copenhague, descansa sobre una visión esencialmente probabilística. Por ejemplo, si se va a llevar a cabo una observación de la posición de un electrón que puede estar en dos lugares (A y B), solo podemos hablar de —y calcular— las probabilidades asociadas a cada opción, nunca de certeza absoluta. Una vez realizada la medida, el electrón queda entonces localizado en una determinada posición (por ejemplo, A). Everett consideró, sin embargo, que ambas opciones, A y B, se realizaban, pero en mundos distintos, de modo que la realidad se ramifica para cada alternativa: en un caso el observador afirmará que el electrón está en A, y en el otro, que está en B. Es equivalente a aceptar la paradoja del gato de Schrödinger: en un universo el gato está vivo pero en otro está muerto.

La visión de Everett introdujo la existencia de universos paralelos coexistentes como una realidad posible aunque difícilmente comprobable, por no decir imposible de demostrar. Esta interpretación, que carece del apoyo de la inmensa mayoría de la comunidad científica, conduce a una multiplicidad de mundos incomunicados entre sí.

Una cuestión trascendental que subyace en cualquier concepción del multiverso es si se adapta o no a lo que tradicionalmente entendemos por una propuesta científica. Así, en general, los universos burbuja no exhibirán geometría plana ni serán muy homogéneos en la distribución de materia. Dado que prácticamente todas las posibilidades se han de realizar, cabe plantearse si la hipótesis de la inflación explica algo de nuestro universo, una cuestión sobre la que volveremos al final del libro.

LA FLECHA DEL TIEMPO

La mayoría de las leyes que rigen el microcosmos son simétricas respecto a un cambio de signo de la variable tiempo: no distin-

EL MULTIVERSO Y SUS TIPOS

Algunos cosmólogos, atraídos por la posibilidad de una inflación eterna, han propuesto una «nueva revolución copernicana», aún más atrevida que la idea de desplazar a la Tierra del centro del universo. Nuestro universo sería uno más entre una miríada de ellos. Max Tegmark ha propuesto cuatro tipos o niveles de multiversos.

Nivel 1

Se corresponde con la visión de universos separados, inobservables, pero semejantes. Es la hipótesis menos comprometedora acerca de la existencia de universos además del nuestro.

Nivel 2

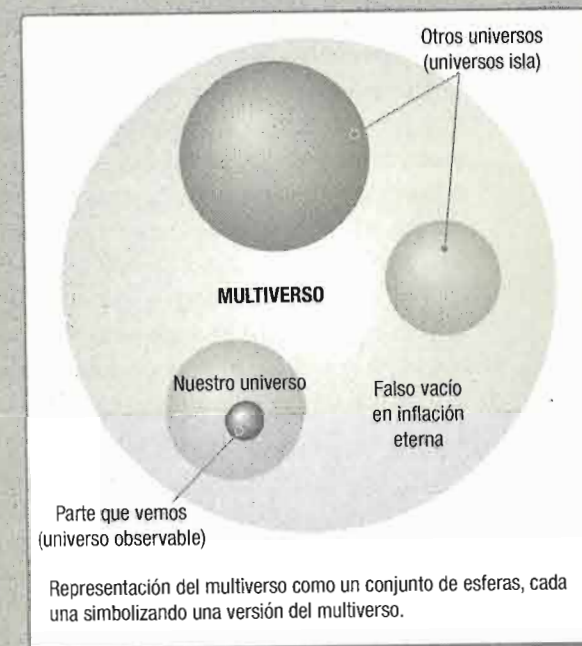
Las leyes físicas, o incluso el número de dimensiones espaciales, son diferentes. La mayoría serían estériles, aunque algunos podrían contener vida inteligente, posiblemente muy diferente a la de nuestro planeta. La teoría de cuerdas se corresponde con este tipo de multiverso.

Nivel 3

Hace referencia a universos que se ubican en «alguna parte» diferente del espacio habitual. En física el tiempo se considera un modo de describir el movimiento y los cambios. La hipótesis de mundos paralelos, que abarcan todos los posibles cambios, permite reinterpretar el tiempo como una manera de secuenciar esta variedad de universos. Los universos en sí serían estáticos, siendo el cambio una mera ilusión.

Nivel 4

Contempla la posibilidad de que todas las estructuras matemáticas consistentes tengan su correspondencia con el mundo físico, cada una con su respectivo universo, una visión radical del platonismo. Sin embargo, surge la duda de si la exigencia de consistencia puede adolecer de un sesgo antropomórfico.



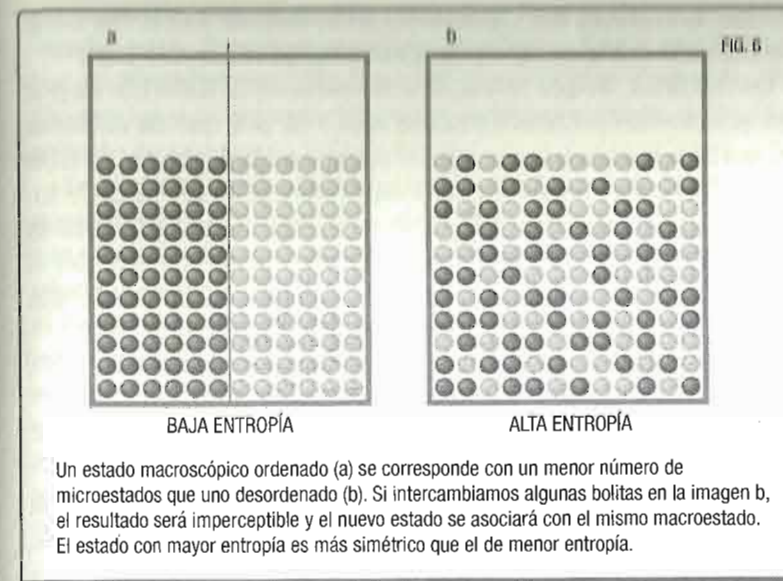
guen entre pasado y futuro. Sin embargo, si bien es normal que se enfríe el agua caliente de la bañera, nos asombraría que comenzara a calentarse hasta hervir a temperatura ambiente. La asimetría en el desarrollo de acontecimientos es evidente y da lugar a la denominada *flecha del tiempo*.

En el siglo XIX el físico alemán Ludwig Boltzmann introdujo el concepto de *entropía* para explicar cualitativa y cuantitativamente lo que sucede en la evolución temporal de los fenómenos observados en la naturaleza. Para ello hay que distinguir entre microestado y macroestado de un sistema físico. Pongamos el ejemplo de una taza de café con leche: un macroestado queda determinado al especificar su volumen, temperatura y otras propiedades generales. Un microestado se describe mediante la posición y velocidad de las moléculas del líquido. La idea esencial es que un conjunto de muchos microestados se puede corresponder con un mismo macroestado. La entropía mide el número de microestados correspondientes a un mismo macroestado y la evolución natural del sistema es aumentar la entropía, lo que se traduce en un incremento del «desorden» (figura 6).

Imaginemos el caso del café con leche: al verter café en la leche hay muchas más maneras de que las moléculas se distribuyan (microestados) de modo que el café y la leche se mezclen, frente a la opción de que permanezcan separados, a la que correspondería un conjunto mucho menor de microestados. La mezcla tiene una mayor entropía que el café y la leche por separado.

Por tanto, no resulta sorprendente que la entropía aumente con el tiempo debido a que el número de microestados es mayor; ¡es pura estadística! Parece que se ha encontrado la razón de la flecha del tiempo y no hay duda de que es un gran hallazgo científico. Sin embargo, la evolución hacia estados de mayor entropía no acaba de explicar la actual entropía en nuestro universo, sino que más bien traslada la pregunta a los instantes iniciales del Big Bang. Así, el origen de la flecha del tiempo puede remontarse hasta los primeros momentos del universo tras la Gran Explosión.

En el universo primitivo, tras la inflación y el recalentamiento, la gran mayoría de partículas elementales que actualmente constituyen el universo estaban concentradas en un pequeño vo-



lumen muy denso, y distribuidas de modo bastante homogéneo, como indica el fondo cósmico de microondas. Empezó entonces la expansión no acelerada del universo, regida por la constante de Hubble.

Sabemos que cuando se expande un gas y se ignora la gravedad, su entropía aumenta. En cambio, al tener en cuenta la interacción gravitatoria, un gas con una distribución uniforme presentará una baja entropía y al contraerse en un volumen fijo ¡aumenta su entropía! Este hecho, sin relevancia en cualquier laboratorio habitual al poderse ignorar la atracción gravitatoria entre moléculas, tiene una importancia capital en cosmología.

En efecto, a escala cósmica, al agregarse la materia para formar estructuras complejas como estrellas y galaxias, aumenta la entropía del universo. También los agujeros negros son verdaderos «almacenes» gigantes cuya entropía va aumentando a medida que atrapan materia en su interior. Por ejemplo, el agujero negro que se halla en el centro de la Vía Láctea, con una masa aproximada de un millón de soles, contiene cien veces más entropía que todas las partículas ordinarias del universo observable. Por consi-

guiente, la entropía del universo inmediatamente tras el Big Bang y antes de la inflación debió de ser extraordinariamente baja.

En resumen, lo que no explica la teoría de la inflación es por qué el universo primitivo era tan especial, por qué su entropía era tan baja y, en consecuencia, el porqué de la flecha del tiempo que observamos. Según algunos especialistas, la teoría de la inflación agrava más el problema: el recalentamiento al final de la era de la inflación incrementa la entropía, lo que implica que el estado inicial del universo debía ser incluso más ordenado que en otras teorías del Big Bang sin fase de inflación.

ALTERNATIVAS A LA INFLACIÓN Y AL BIG BANG

Pese a que la posición mayoritaria de los cosmólogos sea la aceptación del paradigma inflacionario con sus grandes aciertos, la posibilidad de que la inflación no haya ocurrido jamás también debe ser considerada en una buena praxis científica. La cuestión se puede extrapolar incluso más hacia atrás en el tiempo, y plantearse si el propio Big Bang, asociado a una singularidad espaciotemporal, llegó siquiera a existir.

Aclaremos primero que con alternativa al Big Bang no nos estamos refiriendo al modelo estacionario del universo, cuya incapacidad para explicar el fondo cósmico de microondas, así como las grandes estructuras jerarquizadas del universo, ya se puso de manifiesto al comienzo de este libro. Nos estamos refiriendo más bien a modificaciones fundamentales de la física y la cosmología que han de adoptarse para intentar explicar —o evitar— la singularidad inicial manteniendo lo ya conseguido por el modelo cosmológico estándar, que es mucho.

El Gran Rebote

Una alternativa propuesta por algunos cosmólogos para evitar la singularidad inicial del Big Bang es suponer que el origen de nuestro universo se debe a una especie de rebote de un universo

preexistente, que se podría encuadrar dentro de un escenario «tradicional» de universo cíclico u oscilante. Según sus defensores, un Gran Rebote (*Big Bounce*) tras una gran implosión (*Big Crunch*) puede reproducir una evolución semejante al Big Bang seguido de una época inflacionaria.

Se han propuesto distintas teorías cuánticas de la gravedad, según las diferentes maneras de aplicar los principios cuánticos a la relatividad general. En particular, vamos a considerar aquí la teoría cuántica de lazos o de bucles. Inicialmente formulada por el físico hindú Abhay Ashtekar en 1986, esta teoría supone que el espacio-tiempo está formado por una red de lazos entrelazados en una especie de espuma. Sostiene que el espacio no es suave y continuo, sino que consta de trocitos indivisibles (del tamaño de la longitud de Planck) que constituyen una malla de «átomos de espacio-tiempo», con una capacidad finita de almacenamiento de energía.

Cuando se combinan los cálculos de la gravedad de bucles con la cosmología, el punto inicial del Big Bang deja de ser una singularidad intratable; sigue suponiendo un instante con una densidad increíblemente elevada, pero finita. Incluso se puede entender la aparición de una antigravedad tras la Gran Explosión, como motor de la expansión inflacionaria del espacio.

Con tal fin, imaginemos el espacio como una esponja porosa y la energía como agua. La esponja puede absorber agua hasta cierto punto; una vez llena, deja de absorber más y la repele. De igual modo, el espacio cuántico tendría una capacidad limitada para absorber energía, y cuando la densidad fuera demasiado grande aparecería una fuerza repulsiva. La gravedad se transforma entonces en antigravedad, expandiendo el espacio hasta que la densidad descienda lo suficiente; entonces la fuerza repulsiva se va atemperando hasta volver a ser atractiva. El excedente de energía se transforma en radiación y materia, que llena el universo reproduciendo el recalentamiento final de la inflación. Observemos que en este caso no es necesario postular *ad hoc* la existencia de un campo inflacionario como el inflatón.

La teoría cuántica de lazos aún está muy lejos de convertirse en candidata a una teoría unificadora en sentido amplio, pues

hasta el momento no ha sido capaz de incorporar la física de partículas. Ni siquiera se ha demostrado que reproduzca la gravedad clásica en tres dimensiones espaciales más la temporal. No obstante, los avances que se están produciendo en esta línea teórica parecen prometedores.

Choque de branas

Otra alternativa a la inflación evitando la singularidad está basada en la teoría de cuerdas, o teoría M en su formulación más general, candidata a unificar la gravedad y el resto de fuerzas de la naturaleza. En verdad, la teoría de cuerdas se plantea como la tan deseada teoría del todo, que podría explicar todos los fenómenos de la naturaleza, unificando todas las fuerzas que actúan sobre todas las partículas.

La idea básica es que las partículas elementales no son realmente puntuales, sin extensión, como en el modelo estándar, sino que poseen una cierta dimensión definida por una *cuerda*, que pasa a ser un objeto fundamental de la naturaleza. Y no solo hay cuerdas, hay objetos extensos de dos o más dimensiones espaciales que se conocen como *branas*. Nuestro universo podría localizarse sobre una brana tridimensional, con consecuencias cosmológicas, como veremos un poco más adelante.

La teoría de cuerdas requiere de la existencia de una simetría adicional, la *supersimetría*, que unifica partículas (fermiones) y portadores de fuerza (bosones) asociando parejas supersimétricas: a cada fermión le corresponde un nuevo bosón (nueva partícula de materia), y a cada bosón, un nuevo fermión (nuevo portador de fuerza). Ahora bien, las masas de las partículas supersimétricas han de ser muy elevadas, por lo que rápidamente se desintegrarán dando lugar a partículas del modelo estándar. Desgraciadamente, y pese al intenso esfuerzo para detectarlas, hasta el momento no hay ninguna prueba experimental de su existencia.

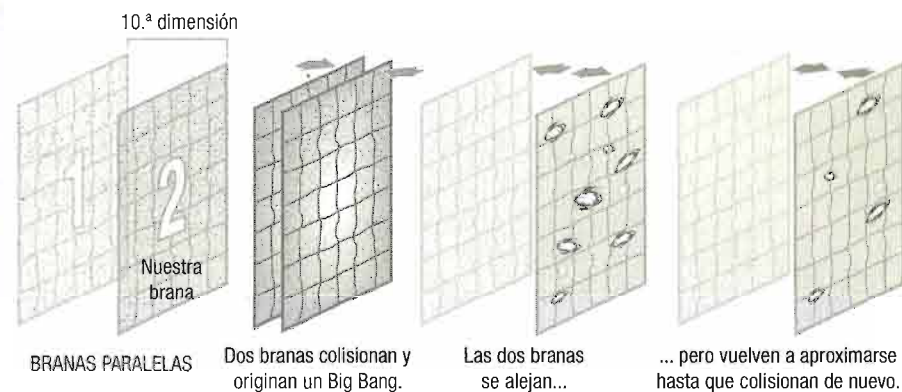
Así pues, el zoo de las partículas elementales, con toda su complejidad y propiedades, se ha de corresponder con los distintos modos de vibración de la cuerda. Quarks, electrones, neu-

trinos, etc., pero también los portadores de las fuerzas (fotón, gluón...) y sus parejas supersimétricas (squark, selectrón, fotino, gluino...). Lo que hace especialmente interesante a esta teoría es que uno de los modos de vibración de la cuerda se puede asociar con el gravitón, que transporta las fuerzas gravitatorias.

Según el modelo ecipirótico (el término procede de la antigua filosofía estoica y significa «conversión en fuego»), nuestro universo sería una de las muchas branas que flotan en un espacio multidimensional. El Big Bang tendría su origen en una colisión con otra brana, pudiendo incluso ocurrir cíclicamente. Dos branas chocan, rebotan, se separan y se atraen mutuamente para chocar de nuevo, y así sucesivamente (figura 7).

Como cabría esperar, la hipótesis ecipirótica no está libre de problemas. Por ejemplo, las branas al colisionar debieron estar situadas paralelas entre sí, pues, de lo contrario, el resultado de la explosión subsiguiente no habría sido lo suficientemente suave como para reproducir las observaciones del universo actual

FIG. 7



Representación del modelo ecipirótico, que plantea que el Big Bang se originó debido a la colisión de dos branas (una de ellas representa nuestro universo) que flotan en un espacio multidimensional. Existe atracción gravitatoria entre las branas, pues el gravitón se propaga por ese espacio, lo que resulta en una colisión y rebote con la posibilidad de que las colisiones se repitan.

tan homogéneo. Es decir, al intentar evitar la singularidad inicial del Big Bang acompañada de la arbitrariedad del potencial del inflatón, se acaba con unas condiciones ajustadas e impuestas *ad hoc*. Por último, y no menos importante, hay que tener en cuenta que una buena parte de la comunidad científica no acepta la teoría de cuerdas, como discutiremos en mayor profundidad en el siguiente capítulo.

El destino final del universo

Los modelos cosmológicos que intentan explicar el origen y la evolución del universo también proporcionan pistas sobre su posible destino: desde un final tranquilo, como la muerte térmica, a un ocaso apocalíptico, como el Gran Desgarro, o un rebote seguido de otro Big Bang para volver a empezar.

El modelo estacionario proponía un universo ilimitado, eterno e inmutable, sin principio ni fin, lo que eliminaba ciertas preguntas «molestas» como, por ejemplo, qué hubo antes del Big Bang o qué hay más allá del borde del universo, en el caso de que este sea finito. Hasta hace poco se solía responder argumentando que tales preguntas carecen de sentido, siendo algo así como preguntar por lo que hay al norte del Polo Norte. Así pues, antes del Big Bang no hubo «antes», porque el tiempo comenzó entonces, ni hay más allá de los límites del universo. Punto final.

Sin embargo, han surgido opiniones discrepantes con esa visión «ortodoxa». Algunos cosmólogos están persuadidos de que el Big Bang no es el principio, sino una puerta de tránsito entre dos etapas, pues, según una de las hipótesis que vimos en el capítulo anterior, la Gran Explosión podría haber sucedido a un colapso previo en un Gran Rebote cósmico. Y si hay un rebote, lo más probable es que haya más de uno, quizá infinitos, llegando así al universo cíclico u oscilante.

Por otro lado, la acumulación durante años de un sinnúmero de observaciones y mediciones astronómicas y astrofísicas utilizando potentes telescopios y detectores, tanto en tierra

como en satélites, ha permitido que la cosmología se haya convertido en una ciencia de precisión, comparable a la física de partículas.

No es únicamente que el hombre esté adaptado al universo. El universo está adaptado al hombre.

JOHN ARCHIBALD WHEELER

Preguntas que hasta hace poco tiempo podían parecer meras elucubraciones han adquirido legitimidad científica. La cuestión acerca del posible final de nuestro universo se ha convertido en una pregunta cos-

mológica válida cuya respuesta depende de propiedades físicas medibles, como la densidad de materia y energía del universo, su tasa de expansión, y de una mejor comprensión de la naturaleza de la materia y la energía oscuras.

Con ese fin, los modelos cosmológicos han de recurrir a la física de partículas para entender la dinámica del universo, y viceversa. Comprobaremos, una vez más, que los límites del conocimiento científico coinciden con la exploración de los límites del universo, del microcosmos y del macrocosmos.

La interesante película *El curioso caso de Benjamin Button* (2008), dirigida por David Fincher y basada en un relato del escritor Francis Scott Fitzgerald, narra la insólita historia de un hombre que nace con el cuerpo de una persona de ochenta años y que, con el transcurso del tiempo, va rejuveneciendo hasta morir como un bebé. La película pone de manifiesto ciertas semejanzas entre las diferentes etapas de la vida humana, entre la juventud y la ancianidad, el nacimiento y la muerte.

¿Puede ocurrir algo semejante entre el origen y el final de nuestro universo, entre el origen del tiempo y su posible final?

Abordaremos esta cuestión fundamental acudiendo en primer lugar a la física de los agujeros negros. Desde la formulación de la relatividad general por Albert Einstein, es bien sabido que los campos gravitatorios alteran el transcurso del tiempo —el sistema de posicionamiento global o GPS no funcionaría correctamente si se pasara por alto este efecto causado por el campo gravitatorio terrestre—. En el caso de un agujero negro, donde los campos son enormemente intensos, ¿podría llegar a detenerse la marcha del tiempo totalmente?

AGUJEROS NEGROS FRENTE A BIG BANG

Cuando en una región del espacio la densidad de materia sobrepasa un cierto límite, el espacio-tiempo se deforma tanto en su interior, curvando las trayectorias, que ni materia ni radiación pueden escapar de él. Tal región se conoce como *agujero negro*, término acuñado por John Archibald Wheeler en 1967. Para hacernos una idea, pensemos que la Tierra debería comprimirse hasta el tamaño de una pelota de tenis para transformarse en un agujero negro.

Cualquier agujero negro contiene en su centro una singularidad rodeada de un *horizonte de sucesos*, que se comporta como una especie de barrera que impide que se establezca un flujo de información desde el agujero negro hacia el exterior. Robert Oppenheimer, Hartland Snyder y B. Datt demostraron en la década de 1930 que tras el colapso de estrellas masivas, esféricas y de densidad constante, se forma una singularidad con su correspondiente horizonte de sucesos, esto es, un agujero negro. En 1969 el físico y matemático británico Roger Penrose extendió esta conclusión a cualquier tipo de estrella según su hipótesis de *censura cósmica*, según la cual ninguna singularidad carece de horizonte de sucesos, siendo esta una de las conjeturas más importantes en relatividad general clásica aún no probadas.

Así pues, oculta tras el horizonte de sucesos una singularidad resulta «inofensiva», por lo que las leyes de la física se pueden seguir aplicando tranquilamente en el mundo exterior. No obstante, se ha venido especulando acerca de la posible existencia de singularidades desnudas, que carecen de horizonte de sucesos y son, por tanto, observables, violando así el principio de censura cósmica. Se formarían en colapsos de estrellas más realistas, ni esféricas ni perfectamente homogéneas, con gran variedad de posibilidades. Mediante simulaciones por ordenador se ha concluido que, según el grado de heterogeneidad y la velocidad del colapso se formarían agujeros negros o singularidades desnudas. Por otro lado, los agujeros negros podrían perder la protección del horizonte de sucesos y convertirse en singularidades desnudas si su velocidad de giro fuera muy elevada.

¿QUÉ NOS ENSEÑAN LOS AGUJEROS NEGROS?

Contemplados desde fuera, los agujeros negros constituyen objetos «sencillos», caracterizados por su masa, su momento angular en el caso de que giren, y su carga eléctrica si es que la tienen. Por eso, en la década de 1960 el físico estadounidense John Wheeler afirmó que los agujeros negros «no tienen pelo», una expresión para indicar que carecen de cualquier particularidad, más allá de las tres citadas más arriba. Pero un estudio teórico llevado a cabo en 1974 por Stephen Hawking, utilizando la mecánica cuántica, vino a alterar esa visión simple de los agujeros negros. Hawking mostró que las fluctuaciones cuánticas del vacío en las cercanías del horizonte de sucesos originarían una débil radiación hacia el exterior, denominada radiación de Hawking. Al surgir espontánea y fugazmente una pareja partícula-antipartícula cerca del horizonte de sucesos, una de ellas podría caer dentro y la otra escapar, a expensas de la energía gravitatoria del interior. Por ello, con el transcurso del tiempo un agujero negro aislado irá perdiendo masa a un ritmo inversamente proporcional a esta. En particular, un agujero negro de dimensiones subatómicas desaparecerá casi instantáneamente, mientras que los más masivos necesitan un tiempo comparable a la edad del universo para evaporarse totalmente.

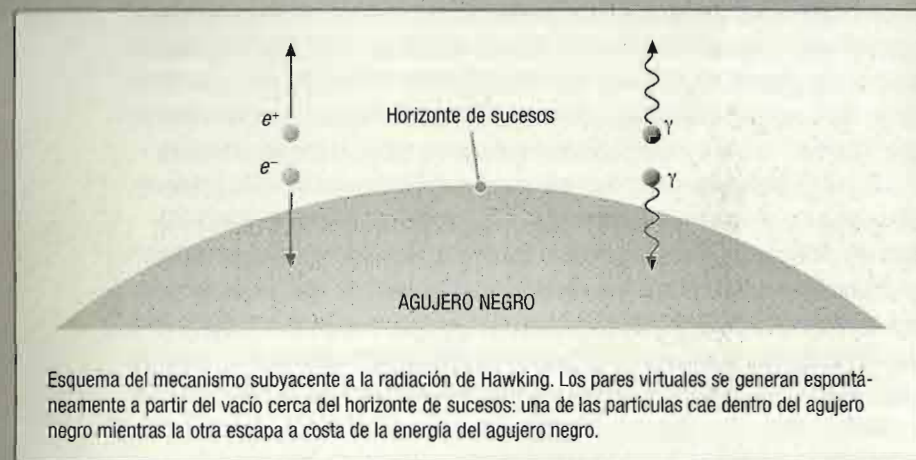
El problema de la entropía

Como sucede con cualquier cuerpo que emite ondas electromagnéticas con diferentes frecuencias, al espectro de la radiación de Hawking se puede asociar con una «temperatura». En un cuerpo ordinario la temperatura se relaciona con el movimiento o agitación de sus partículas constituyentes (moléculas, átomos...) y la entropía es una medida del grado de desorden. Sin embargo, un agujero negro carece de cualquier tipo de subestructura formada a partir de componentes o estados, pues únicamente está caracterizado por su masa, momento angular y carga. Llegamos, por tanto, a una contradicción: mientras que la relatividad general indica

que hablar de la entropía de un agujero negro carece de sentido, la mecánica cuántica exige una gran cantidad de entropía.

El problema de la Información

La radiación de Hawking también pone en apuros a la propia teoría cuántica. Uno de sus principios fundamentales postula que en los sistemas físicos la evolución unitaria, es decir, sin realizar ningún tipo de medida, debe ser un proceso reversible. Por ejemplo, si rompemos a martillazos el disco duro de un ordenador, y luego quemamos sus restos, la información permanecerá codificada en las cenizas, el humo y la luz, aunque sea imposible recuperarla en la práctica. Sin embargo, el carácter térmico de la radiación de Hawking implica que los agujeros negros destruyen por completo la información, ya que la radiación emitida, al ser térmica, nada tiene que ver con información contenida en la materia que haya podido caer anteriormente en el agujero negro, lo cual resulta incompatible con la teoría cuántica.



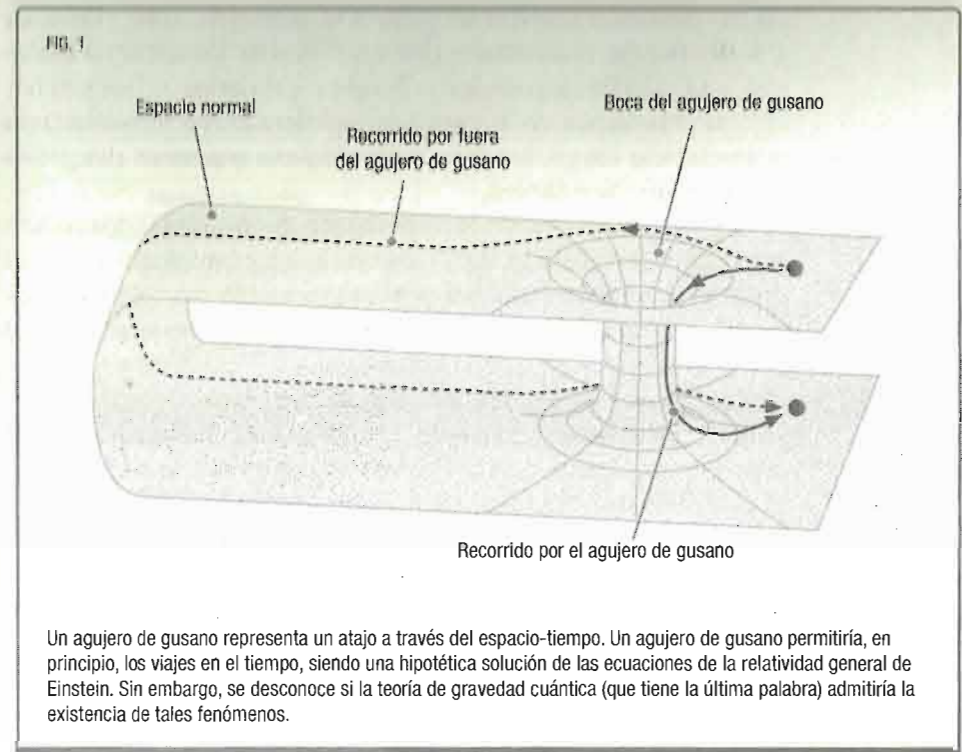
Una representación artística realizada mediante ordenador de la radiación de Hawking, un fenómeno que puede llevar a un agujero negro a evaporarse completamente.

Si la singularidad del Big Bang se contempla como el comienzo del tiempo, las singularidades en el seno de los agujeros negros se podrían interpretar como el fin del tiempo, al menos para la materia que caiga dentro de ellos. Esta imagen resulta tentadora al establecer una simetría entre dos singularidades, una al comienzo y otra al final del tiempo. Incluso se ha especulado sobre si los agujeros negros podrían constituir puertas hacia otros universos desconocidos o entre partes de un mismo universo, lo que se conoce como *agujeros de gusano* (figura 1). Es el caso, por ejemplo, de la audaz propuesta de Lee Smolin conocida como teoría de los universos fecundos.

Según el planteamiento de Smolin, un agujero negro al colapsar originaría otro universo «al otro lado», inobservable desde el nuestro. Según esta hipótesis, los parámetros y constantes fundamentales del nuevo universo podrían cambiar, pero solo ligeramente, con respecto al universo «padre». Lo más llamativo de esta propuesta es que un universo padre tendría mayor descendencia cuantos más agujeros negros generase. Esta circunstancia se traduce en una especie de selección natural para universos, que recuerda al mecanismo biológico, de modo que aquellos universos que dispusieran de un mayor número de agujeros negros serían más probables.

La propuesta de Smolin fue una de las primeras versiones del multiverso surgida a partir de argumentos puramente cosmológicos, y fue bien acogida por Leonard Susskind, uno de los padres de la teoría de cuerdas, entre otros. Curiosamente, unos años más tarde, el concepto de multiverso volvió a emerger, esta vez dentro del formalismo de las cuerdas, con el principio antrópico como una hipótesis auxiliar defendida por Susskind, convirtiéndose Smolin entonces en uno de sus más pertinaces críticos.

Notemos finalmente que un Big Bang convencional ha de ser bastante diferente de otro generado en un agujero negro, pues la entropía del universo primigenio debió de ser extraordinariamente baja, mientras que la entropía de un agujero negro es enorme. Así pues, aunque la propuesta de Smolin no goza del favor de mayoría de la comunidad científica, no deja de ser una interesante especulación sobre la génesis de un multiverso.



COSMOLOGÍA DE PRECISIÓN

En los últimos años, la cosmología ha pasado de ser una materia con cierto carácter especulativo y más bien teórica a ser considerada como una ciencia de precisión. Cabe destacar las mediciones del fondo cósmico de microondas realizadas inicialmente por los satélites COBE y más tarde con mucha mayor resolución por WMAP y Planck. Por otro lado, no hay que olvidar la extraordinaria aportación realizada por el telescopio espacial Hubble, y en general las observaciones con telescopios ópticos de gran potencia y radiotelescopios, que han jugado y juegan un papel fundamental para entender la evolución de las estructuras del universo. Los avances en el conocimiento de la nucleosíntesis y

de los procesos que dieron lugar a la asimetría entre bariones y antibariones, el detallado conocimiento de la dinámica galáctica y la distribución de los cúmulos de galaxias y, por último, el descubrimiento de la expansión acelerada del universo, han determinado los parámetros cosmológicos con unos márgenes de error muy aceptables.

Todo ello ha permitido la formulación del denominado modelo estándar cosmológico (MEC), que juega en cosmología un papel análogo al modelo estándar en física de partículas. Matemáticamente está basado en la teoría de la relatividad general, utilizando la teoría cuántica de campos para describir la materia y sus interacciones. Actualmente el MEC resulta ser el modelo más acorde con las observaciones astronómicas vigentes, incluyendo en su formulación las aún desconocidas materia y energía oscuras.

Conviene enfatizar que nada dice el MEC acerca de la naturaleza de la singularidad inicial origen del Big Bang —excepto que debió existir—, a la espera de una teoría que englobe relatividad y mecánica cuántica, lo cual conlleva una profunda interrelación con la física del microcosmos. El objetivo del modelo estándar cosmológico es tratar de explicar la génesis de la materia y la radiación, y la consiguiente formación y evolución de las estructuras del universo y su destino final.

Del mismo modo que existen alternativas para el modelo estándar de la física de partículas, también se han realizado propuestas cosmológicas que difieren del MEC, como, por ejemplo, los modelos de gravedad modificada. Una de estas versiones conocida como MOND (*MOdified Newtonian Dynamics*), se postuló originalmente para soslayar la hipótesis de la materia oscura. Aunque describe el movimiento de rotación de las estrellas en nuestra galaxia, MOND es incapaz de explicar adecuadamente la dinámica de los cúmulos de galaxias, por lo que, entre otras razones, está considerada más bien como una teoría marginal por la mayor parte de la comunidad de astrofísicos. Como una propuesta más radical, la teoría de cuerdas conduce a una cosmología propia de la que hablamos brevemente en el capítulo anterior, según el modelo eciprótico como alternativa a la singularidad del Big Bang.

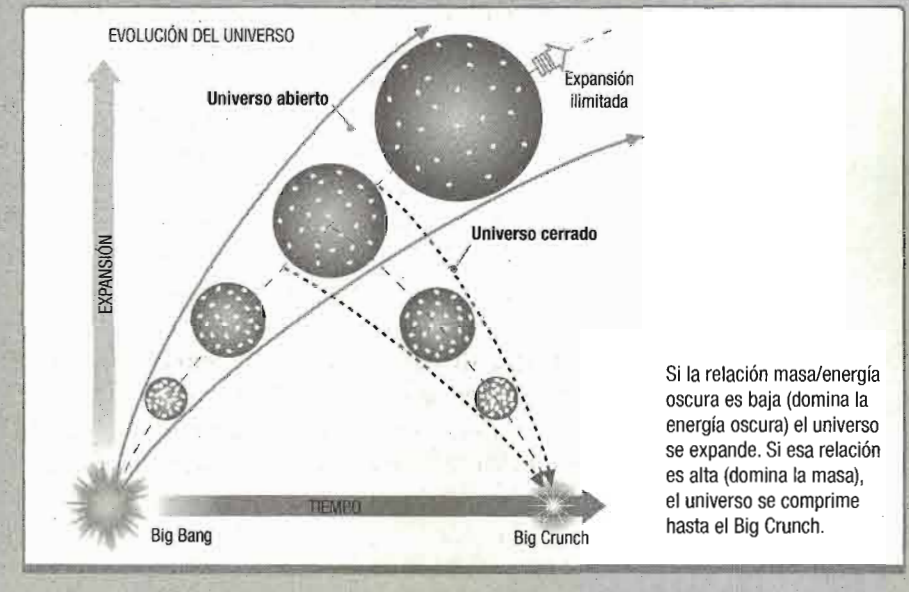
EL MODELO ESTÁNDAR COSMOLÓGICO

Este modelo tiene seis parámetros independientes y varios más derivados, algunos de los cuales se recogen en la tabla, según las medidas tomadas por el satélite Planck en 2015:

Constante de Hubble	H_0	$67,74 \pm 0,46 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$
Densidad bariónica	Ω_b	$0,0486 \pm 0,0010$
Densidad de materia oscura fría	Ω_c	$0,2589 \pm 0,0057$
Densidad de materia	Ω_m	$0,3089 \pm 0,0062$
Densidad de energía oscura	Ω_Λ	$0,6911 \pm 0,0062$
Densidad crítica	ρ_c	$(8,62 \pm 0,12) \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$

Los parámetros Ω_i , donde el subíndice i representa cada componente del universo, se definen como densidades relativas a la densidad crítica, que es la densidad necesaria para que la geometría global del universo sea plana. Es decir, sin energía oscura, la densidad de materia y radiación solo contribuye en un 30%, aproximadamente, para que el universo sea plano. La densidad total relativa, teniendo en cuenta la contribución de la materia bariónica y oscura (Ω_m), radiación (Ω_r , siendo esta muy pequeña) y de la energía oscura (Ω_Λ), resulta ser:

$$\Omega_{\text{tot}} = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda = 1,0023 \pm 0,0054$$



Geometría del espacio-tiempo

De acuerdo con la teoría de la relatividad general, la geometría global del espacio-tiempo está determinada por la densidad de materia y energía. Una curvatura negativa corresponde a un universo abierto, espacialmente infinito; una curvatura cero corresponde a un universo plano, y una curvatura positiva conduce a un universo cerrado. Conviene puntualizar que estamos hablando de la curvatura de una «superficie» de cuatro dimensiones, lo cual no permite una representación gráfica completa, aunque se populariza mediante imágenes de superficies bidimensionales (figura 2).

El parámetro fundamental que determina la curvatura del universo es omega (Ω), definido como la densidad de materia media del universo (ρ) dividida por el valor crítico de esa densidad (ρ_c) para el cual el universo es plano:

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c} = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda.$$

La suma de los tres términos de la derecha tiene en cuenta la composición del universo mediante los parámetros Ω_m , Ω_r y Ω_Λ , correspondientes a la materia (visible y oscura), la radiación y la energía oscura, respectivamente. Todos ellos están definidos como cocientes entre la densidad de cada componente y la densidad crítica ρ_c , por ejemplo, Ω_m sería el cociente entre ρ_m y ρ_c . Las densidades y los parámetros han ido cambiando a lo largo de la evolución del universo.

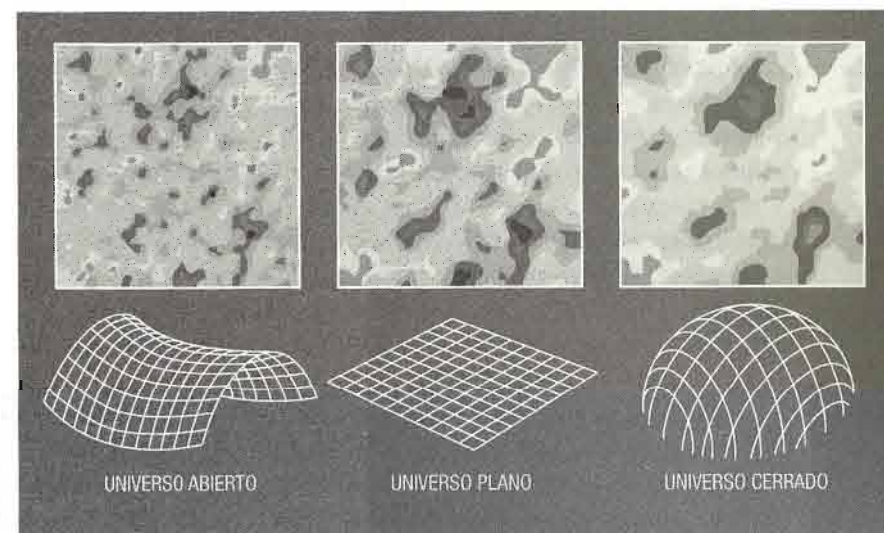
Según sea el valor de Ω , igual, menor o mayor que 1, surge un universo plano, abierto o cerrado, respectivamente (figura 2). Desde el punto de vista observacional, si el universo fuera plano los gránulos brillantes básicos del fondo cósmico de microondas deberían ser observados bajo un ángulo de un grado aproximadamente. Si fuera abierto, serían menores de un grado, y mayores para un universo cerrado.

Los valores de los parámetros Ω_m , Ω_r y Ω_Λ que proporcionan las mediciones realizadas por el satélite Planck en 2015 indican que, en números redondos, el 5% del universo está constituido

por materia bariónica (protones y neutrones), el 25% es materia oscura —que no se sabe lo que es, aunque hay candidatos más allá del modelo estándar— y el 70% restante es energía oscura —que ni se sabe lo que es, ni hay candidatos procedentes de la física de partículas—.

Mediante los datos obtenidos en diferentes observaciones se halla que la densidad del universo es muy cercana a la densidad crítica, proporcionando el valor $\Omega = 1,0023 \pm 0,0054$, lo que significa en términos geométricos que el universo es compatible con ser plano, y por tanto infinito, como predice el paradigma inflacionario, aunque como tiene una edad finita solo tenemos acceso observacional a una porción limitada, lo que se denomina el universo observable.

FIG. 2



En un universo abierto (con $\Omega < 1$ y curvatura negativa) la separación típica entre los gránulos brillantes del fondo cósmico de microondas sería inferior a un grado. En un universo plano (con $\Omega = 1$ y curvatura nula) la separación típica sería igual a un grado. En un universo cerrado (con $\Omega > 1$ y curvatura positiva) sería superior a un grado.

LA EXPANSIÓN ACELERADA DEL UNIVERSO

Einstein introdujo la constante cosmológica en sus ecuaciones de la relatividad general para conseguir un universo estático que constituía entonces el paradigma cosmológico mayoritariamente aceptado. Con el descubrimiento por parte de Edwin Hubble de la expansión del universo, y tras serias dudas, Einstein retiró la constante cosmológica, permitiendo un universo en expansión.

Desde un punto de vista teórico general, un término con esta constante es totalmente posible en las ecuaciones de la gravitación. La ausencia de dicho término se puede interpretar como que la constante cosmológica toma el valor cero. Sin embargo, con el descubrimiento realizado en 1998 de la expansión acelerada del universo, la constante cosmológica entró en escena de nuevo.

La energía oscura: la mano invisible que mueve el universo

La principal prueba de la existencia de la energía oscura ha sido posible gracias a que las supernovas de tipo Ia pueden ser utilizadas como balizas de posición a grandes distancias. Resulta que las galaxias más lejanas, y por tanto más antiguas, se alejan más despacio de lo que predice una simple extrapolación lineal a partir de las galaxias más cercanas. En otras palabras, la «constante» de Hubble en realidad no es constante, sino que varía con el tiempo de modo que, en vez de frenarse como cabría pensar por la acción gravitatoria atractiva, el universo está acelerando su expansión.

Una explicación podría ser que las leyes de la gravitación de Einstein han de ser modificadas, como ya comentamos brevemente, de modo que la gravedad disminuya más rápidamente de lo supuesto y no oponga siempre la misma resistencia a la expansión. Otra posibilidad alternativa es que el universo a grandes escalas no fuera homogéneo ni isótropo, situándose la Tierra en una región del espacio donde hubiera un vacío relativo gigantesco respecto al resto. En consecuencia, el ritmo de expansión

del universo variaría según la posición, lo cual se podría interpretar como que varía con el tiempo. Podemos imaginar que el globo que se infla, según la imagen que habitualmente populariza la expansión del universo (véase la figura 2 del primer capítulo, pág. 23), está hecho de un material cuya elasticidad varía según el tramo de superficie considerado. Así, el globo se hinchará con diversas velocidades, generando la impresión, visto desde una determinada posición sobre el propio globo, de que el ritmo de la expansión no es constante.

Ninguna de las hipótesis citadas anteriormente, ya sea la gravedad modificada o la «inhomogeneidad» del espacio, goza de gran aceptación entre los especialistas. Por ello, para explicar la expansión acelerada del universo se precisa de una fuente de energía extraordinaria, de origen y naturaleza todavía desconocidos, que ha sido bautizada como energía oscura, porque no interacciona con la luz, al igual que sucede con la materia oscura. Mientras que existen candidatos para materia oscura más allá del modelo estándar, como por ejemplo ciertas partículas supersimétricas supuestamente estables y eléctricamente neutras llamadas *neutralinos*, hoy en día no se dispone de ningún candidato para energía oscura predicho en algún otro dominio de la física. Solo podemos caracterizarla mediante propiedades muy generales deducidas de los escasos datos observacionales de los que se dispone.

Así, la energía oscura ha de ser muy homogénea en todo el universo y de densidad muy baja, correspondiente a unos pocos átomos de hidrógeno por metro cúbico. Utilizando la relación energía-masa, toda la energía oscura contenida en nuestro sistema solar equivaldría tan solo a la de un asteroide de pequeñas dimensiones. Por ello, la presencia de energía oscura apenas altera la dinámica planetaria, incluso galáctica, lo que explica por qué ha permanecido ignorada durante tantos años. Sin embargo, como ocupa uniformemente todo el espacio intergaláctico, ejerce una influencia imposible de ignorar sobre la evolución del universo a escalas medias y grandes.

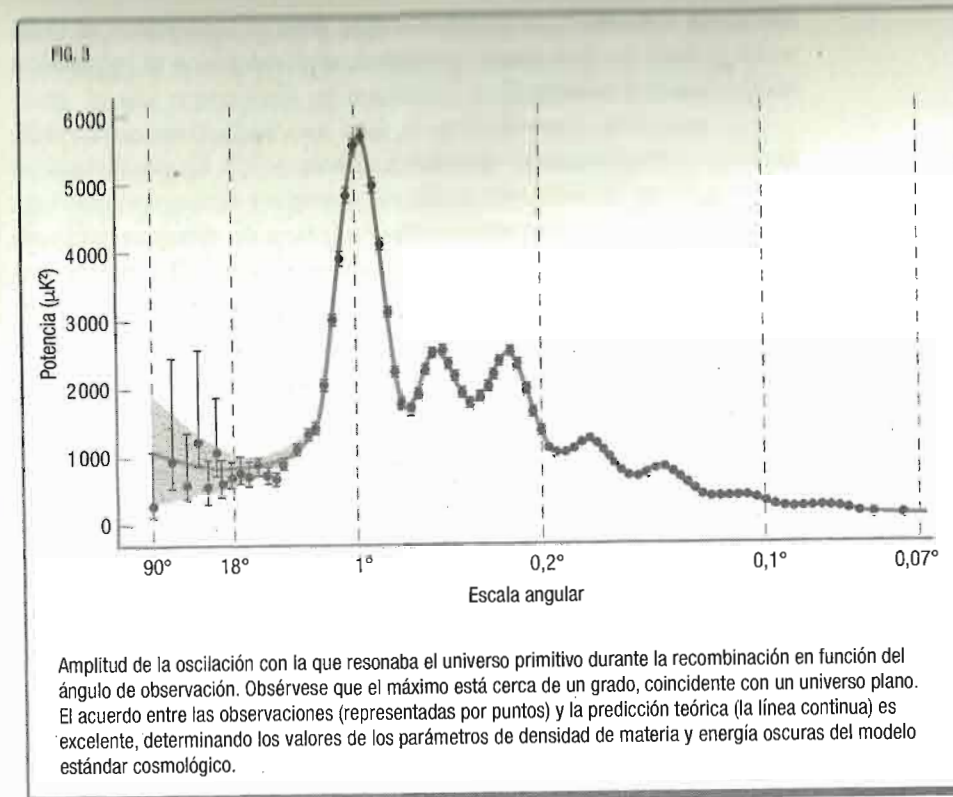
La prueba de la existencia de la energía oscura y la expansión acelerada del universo no se basa únicamente en el estudio del

desplazamiento hacia el rojo de la luz procedente de galaxias muy lejanas. También la radiación fósil del fondo cósmico de microondas contiene un regalo inesperado en relación con el «lado oscuro» del universo. En particular, el llamado espectro de potencia que presentamos en la figura 3 muestra una serie de características propias de un fenómeno resonante (que se refuerza para ciertas frecuencias) que tuvo lugar en el universo primitivo durante la recombinación.

En aquella época, el plasma caliente formado por materia bariónica y oscura oscilaba mediante ondas de presión, esto es, una especie de ondas sonoras, como si se tratara de la caja de resonancia de un instrumento musical con las dimensiones del universo de entonces. Los picos acústicos que se pueden ver en la figura 3 se asocian con distintos modos estacionarios de la oscilación durante la época de la recombinación, proporcionando una valiosa información: el primero (situado en un grado de arco aproximadamente) determina la curvatura del universo, el segundo y el tercero están relacionados con las densidades relativas de la materia bariónica y oscura.

En general, el patrón de picos se ajusta bien dentro de los intervalos hallados mediante otras técnicas observacionales, mediante una curva utilizando los parámetros del modelo estándar cosmológico. Esta concordancia confiere una extraordinaria solidez al modelo cosmológico y su interpretación en términos de materia y energía oscuras, pese a no haberse detectado en un laboratorio terrestre, ni conocer su naturaleza.

Por último, además de ser la causa más probable de la expansión acelerada del universo, la energía oscura también ha desempeñado un papel nada desdeñable en la arquitectura cósmica a gran escala, por ejemplo inhibiendo la formación de estrellas jóvenes y actuando sobre la configuración galáctica. El estudio de la evolución de tales estructuras con la edad del universo ha de permitir determinar si la densidad de la energía oscura se ha mantenido constante o ha ido variando. Ambas posibilidades se traducen en dos grandes modelos que analizaremos seguidamente: la constante cosmológica y la *quintaesencia*.



La constante cosmológica, una vez más

Aunque inicialmente fue concebida para justificar un (inexistente) universo estático al contrarrestar la acción atractiva de la gravedad, su presencia en las ecuaciones de la relatividad general de Einstein conduce a soluciones con una expansión acelerada del universo. Podemos visualizarlo hasta cierto punto mediante la analogía con un automóvil: al apretar simultáneamente el freno, que hace el papel de la gravedad, y el acelerador, equivalente a la constante cosmológica, se puede conseguir un precario equilibrio de fuerzas con el automóvil en reposo, que correspondería al universo estático. Pero si soltamos lige-

ramente el freno o presionamos algo más el acelerador, el vehículo ganará poco a poco velocidad, equivalente a la expansión acelerada del universo.

La constante cosmológica, Λ , está asociada al espacio vacío, pero su naturaleza nos es todavía desconocida. Se puede buscar su origen en el vacío de la teoría cuántica de campos. En un universo descrito por una teoría cuántica de campos correcta hasta energías del orden de la escala de Planck (M_p), se esperaría que Λ fuera del orden de M_p^4 , 120 órdenes de magnitud mayor que el valor medido.

Podemos hacer un razonamiento rápido para obtener esa estimación. Para ello supongamos que nuestra descripción basada en la teoría cuántica ha de fallar para distancias inferiores a la longitud de Planck, que viene fijada como la inversa de la escala de Planck, es decir M_p^{-1} . Imaginemos ahora un minúsculo cubito con esa longitud de arista, lo que proporciona un volumen de M_p^{-3} .

Por otro lado, y según el principio de incertidumbre, la energía acumulada en ese volumen no puede ser cero, debido a las fluctuaciones cuánticas, sino que ha de tomar un valor fijado esencialmente por la misma escala de Planck M_p . Dividiendo la energía contenida en el cubito por su volumen, hallamos la densidad de energía esperada en el vacío:

$$\rho_{\text{teo}} \approx \frac{M_p}{M_p^{-3}} \approx M_p^4 \approx 10^{93} \text{ g/cm}^3,$$

mientras que la constante cosmológica medida experimentalmente en nuestros días se corresponde con una densidad del vacío:

$$\rho \approx 10^{-29} \text{ g/cm}^3.$$

Como puede observarse ¡hay unos 120 órdenes de magnitud de diferencia! La pequeña densidad medida para el vacío se corresponde con una constante cosmológica minúscula, que difiere enormemente del valor esperado. En algún momento se especuló con que debía existir algún tipo de simetría o principio

desconocido que forzara a que Λ fuera exactamente cero. Sin embargo, la constante cosmológica, aun siendo pequeña, no es nula, lo que representa un auténtico quebradero de cabeza para físicos y cosmólogos.

En efecto, la deducción anterior de la densidad de energía del vacío a partir de grandes principios de la física hace que la diferencia con respecto al valor observado sea muy difícil de entender. Si hay una cancelación entre las contribuciones de los diferentes campos, ha de ser tal que conduzca a un valor tan minúsculo de la constante cosmológica que requiere de un ajuste finísimo, nada fácil de justificar. Por ello, tal discrepancia ha sido calificada como «la peor predicción en la historia de la física».

Es de esperar que una teoría válida por debajo de la escala de Planck, combinando necesariamente gravedad y teoría cuántica, pueda explicar en el futuro esta situación. Un intento muy serio de conseguirlo ha sido la teoría de cuerdas.

Antes del descubrimiento de la expansión acelerada del universo mediante la observación de estallidos de supernovas, la mayor parte de la comunidad científica consideraba que la constante cosmológica era cero o negativa. Lo mismo sucedía entre los especialistas en teoría de cuerdas.

No es difícil imaginar la sorpresa producida con la necesidad de una constante cosmológica positiva ($\Lambda > 0$) que impulsara esa gigantesca y prolongada expansión. La solución vino de la mano de la existencia de las branas y antibranas, que permitían la emergencia de un valor positivo para Λ y, además, resolvían el problema de estabilidad de las dimensiones compactificadas. Se resolvieron al mismo tiempo dos grandes dificultades de la teoría de cuerdas: ¡dos por el precio de uno!

Según el modo en el que se adaptan cuerdas y branas a la geometría multidimensional, se puede conseguir que la constante cosmológica emergente sea negativa, cero o positiva. En este último caso, el número de posibles vacíos que conducen a $\Lambda > 0$, de acuerdo con las observaciones astrofísicas, es del orden de 10^{1000} o más, lo que implica en la práctica infinitas soluciones para la teoría de cuerdas.

También la física de partículas emergente de las cuerdas varía con cada solución, obteniéndose distintos valores para los parámetros del modelo estándar. En otras palabras, tenemos ante nuestros ojos un conjunto de soluciones, denominado *paisaje*, en un número prácticamente infinito, donde cualquier cosa es posible. Se quería alcanzar una única teoría del todo (*Theory of Everything*) y se ha terminado con una teoría de cualquier cosa (*Theory of Anything*).

Quintaesencia: el nuevo éter relativista

Aunque una constante cosmológica diferente de cero justifica la expansión acelerada del universo actual, queda por explicar no solo su pequeño valor, sino también por qué ha comenzado a dominar el contenido del universo transcurridos muchos miles de millones de años tras el Big Bang. En consecuencia, se han planteado alternativas que puedan explicar la energía oscura entre las que destacan los modelos de quintaesencia. El nombre se debe a la supuesta sustancia introducida por Aristóteles, el éter, que ocupaba el dominio supralunar, mientras que los (falsos) cuatro elementos describían la materia que conocemos.

En la Edad Media, escolásticos y alquimistas designaron al éter como «quintaesencia», el quinto elemento, que confería sus asombrosas propiedades a la piedra filosofal. Posteriormente los físicos postularon la existencia de un éter luminífero al suponer que la luz, y las ondas electromagnéticas en general, precisaban de algún tipo de medio material para propagarse por el vacío, como sucede con el sonido.

Los experimentos de Michelson-Morley, que pretendían medir la velocidad de la Tierra respecto del éter, fracasaron estrepitosamente. Ese fracaso condujo a Einstein a formular la teoría de la relatividad especial al asumir que la velocidad de la luz es constante, independientemente de la velocidad relativa de la fuente y del observador con respecto al éter. Como sucede en otros ámbitos de la física, el éter desapareció del panorama científico, por innecesario.

En cosmología, los modelos de quintaesencia preconizan la existencia de un campo del tipo de Higgs parecido al inflatón, cuyo vacío tendría un perfil de energía potencial semejante. La intensidad de la quintaesencia cambiaría con el tiempo, y quizá también según la región del universo, al contrario que la constante cosmológica, que siempre habría tenido el mismo valor.

También suele representarse la quintaesencia como un fluido perfecto, pero nada convencional, pues está caracterizado por una presión P negativa y una densidad ρ positiva. Para comprender lo especial que es este fluido, recordemos primero la ley de los gases ideales:

$$PV = nRT,$$

donde P es la presión y V es el volumen ocupado por el gas, n la cantidad del gas (en moles), T la temperatura (en kelvin) y R la constante de los gases ideales. La anterior ley se puede reescribir como:

$$P = k \rho,$$

donde ρ es la densidad molar ($\rho = n/V$) y k es una constante (si la temperatura es constante, $k = RT$). Es decir, una densidad positiva genera una presión positiva, puesto que $k > 0$.

Según la interpretación microscópica del gas, la presión es positiva debido al bombardeo molecular sobre las paredes del recipiente que lo contenga. Si el recipiente tuviera un émbolo móvil, al expandirse, el gas realiza un trabajo disminuyendo su energía interna.

La ecuación de estado correspondiente a la energía oscura se escribe como:

$$P = w \rho,$$

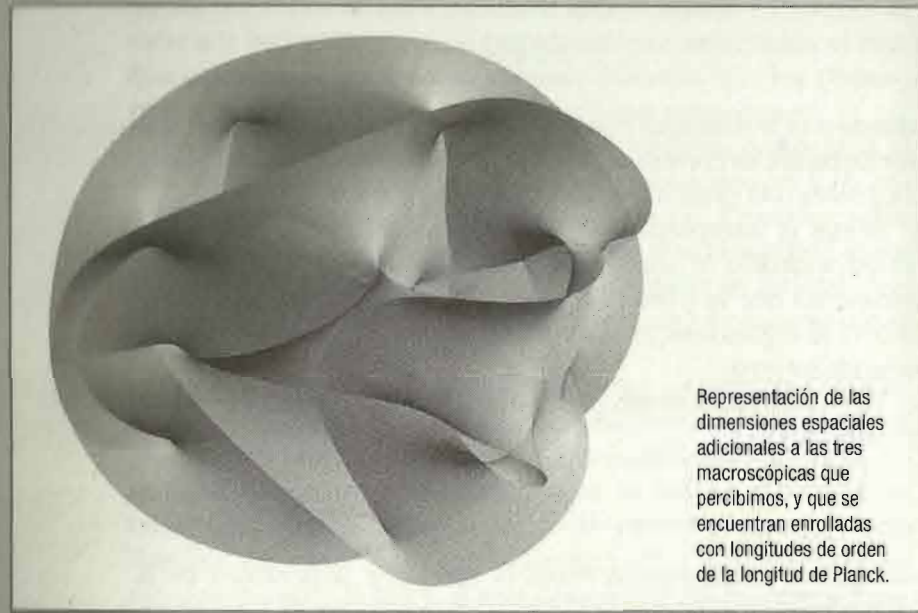
donde P y ρ representan ahora la presión y la densidad de la quintaesencia; el parámetro w es negativo, lo que se traduce en una presión negativa. Los valores de w para otras componentes

BUSCANDO DESESPERADAMENTE UNA TEORÍA DEL TODO

La teoría de cuerdas representa uno de los intentos más serios y persistentes de la comunidad científica por encontrar la ansiada teoría del todo. En su génesis, la idea no puede ser más sencilla: las partículas elementales no son puntuales como preconiza el modelo estándar, sino que se corresponden con diferentes modos de vibración de minúsculas cuerdas, que pueden ser abiertas o cerradas, describiendo todas las propiedades, como masa o carga eléctrica. Pronto se descubrió que uno de los modos de vibración, correspondiente a una cuerda cerrada, se podía asociar con una partícula de características similares al gravitón, el cuanto del campo gravitatorio. De este modo se puede describir la materia y todas las interacciones incluyendo la gravitación dentro de un formalismo cuántico común. Sin embargo, para conseguirlo hay que pagar un precio.

Dimensiones extra

Para que la teoría de cuerdas sea consistente se precisan más dimensiones espaciales además de las tres habituales, en total nueve o diez según el modelo, aparte de la dimensión temporal. La inobservabilidad de esas dimensiones adicionales se explica porque estarían compactificadas («enrolladas» en minúsculas esferas) y solo serían relevantes a escalas muy pequeñas, comparables con la longitud de Planck. Igualmente, «vistas» con la precisión de un experimento actual de altas energías, las cuerdas presentarían un comportamiento muy seme-

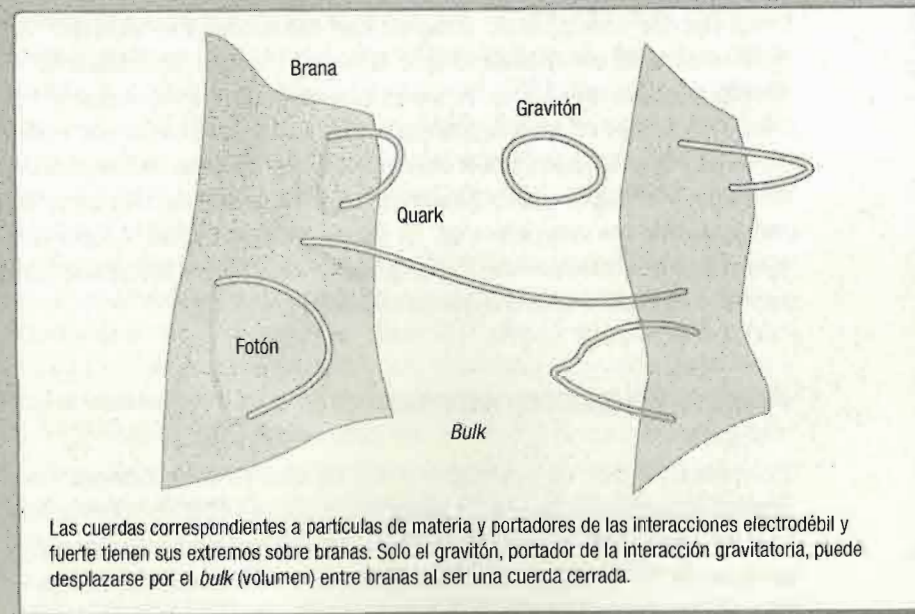


Representación de las dimensiones espaciales adicionales a las tres macroscópicas que percibimos, y que se encuentran enrolladas con longitudes de orden de la longitud de Planck.

jante a partículas puntuales. El modelo estándar sería una aproximación de la teoría de cuerdas para energías bajas. La teoría de cuerdas, además, precisa de la supersimetría, una propiedad más allá del modelo estándar que asocia a cada partícula de materia que es un fermión, otra que sería un bosón, y a cada portador de fuerza que es un bosón, otro que sería un fermión. Hasta el momento no se ha detectado ninguna partícula supersimétrica. Actualmente existen cinco teorías de cuerdas según los modos de implementar la supersimetría. Inicialmente este hecho desconcertó a los especialistas, aunque ahora se sabe que las cinco teorías son distintos casos de una teoría única sobre un espacio de once dimensiones. Sin embargo, los intentos de encontrar partículas supersimétricas en el LHC han resultado vanos hasta la fecha.

Más que cuerdas: branas

Como demostró el físico estadounidense Joseph Polchinski, en el formalismo existen objetos que generalizan el concepto de partícula como una cuerda vibrante: se trata de las branas, cuyo número de dimensiones es variable. Las cuerdas abiertas, como quarks, electrones o fotones, tendrían un extremo fijo en una brana, mientras que las cuerdas cerradas, como el gravitón, podrían propagarse por el llamado *bulk*, o espacio entre branas, lo que explicaría por qué la gravedad es tan débil, al dispersarse en un espacio de mayor dimensionalidad, a diferencia de los otros portadores de fuerza.



Las cuerdas correspondientes a partículas de materia y portadores de las interacciones electrodébil y fuerte tienen sus extremos sobre branas. Solo el gravitón, portador de la interacción gravitatoria, puede desplazarse por el *bulk* (volumen) entre branas al ser una cuerda cerrada.

del universo son $w = 0$ para partículas no relativistas y $w = +1/3$ para la radiación. De hecho, la constante cosmológica es un caso particular con $w = -1$, correspondiente a un campo inflacionario constante.

Si suponemos ahora que el «fluido» de energía oscura se halla en el recipiente mencionado antes, al expandirse el émbolo, la energía interna de la materia oscura «aumentaría», al contrario de un gas común. En el caso del espacio del universo, a medida que se estira, su energía aumenta igualmente.

En consecuencia, el mecanismo por el cual se acelera el universo en la actualidad podría ser semejante al caso del inflatón, responsable de la inflación cósmica primigenia. De hecho ha habido y hay intentos de relacionar la quintaesencia y el inflatón, aunque las escalas de energías respectivas difieren en muchos órdenes de magnitud. Por tanto, el nuevo campo también se deslizaría «rodando» hacia un mínimo de energía potencial a partir de un estado de falso vacío, y la energía así liberada causaría la aceleración actual.

El tipo de dificultades a las que se enfrentan los modelos de quintaesencia es el mismo que tiene el campo del inflatón: la forma precisa que ha de tener el potencial para reproducir las observaciones cosmológicas que implican un comienzo lento de la expansión, para ir acentuándose con la edad del universo. Al mismo tiempo, estos modelos han de evitar consecuencias indeseables en relación con la física de partículas, como por ejemplo, una interacción de la quintaesencia con partículas del modelo estándar que nunca ha sido observada.

POSIBLES FINALES DEL UNIVERSO

Preguntarse por el principio y fin de nuestro mundo es una cuestión tan antigua como la historia de las civilizaciones humanas, vinculada a las reflexiones en torno a la trascendencia y al sentido de la vida y de la muerte. No es de extrañar, por tanto, que las primeras respuestas —con frecuencia visiones apocalípticas— tuvieran raíces místicas y religiosas, para buscar

después una argumentación más racional y filosófica, aunque no libre de prejuicios de todo tipo.

La moderna cosmología permite plantear cuál es el destino final del universo como una pregunta científicamente válida, aunque, honestamente, hay que reconocer que es difícil de contestar hoy por hoy. La respuesta depende del tipo de geometría del universo y su evolución futura, que queda determinada por las proporciones relativas de materia y energía oscura, cuya naturaleza nos es desconocida.

Mi objetivo es simple. Es un entendimiento completo del universo, por qué es, cómo es y por qué existe.

STEPHEN HAWKING

La muerte térmica (*Big Freeze*)

Hasta hace unos años, se consideraba como una opción posible, incluso probable, que la expansión del universo se acabara deteniendo bajo la acción de la gravedad, invirtiéndose el sentido y colapsando en un gran colapso o *Big Crunch*, al cabo de muchos miles de millones de años. La aparente simetría entre las singularidades del Big Bang y del Big Crunch confiere un atractivo a esta posibilidad. En realidad, la entropía de ambos estados sería muy diferente, con consecuencias importantes en el caso de que el proceso fuera cíclico.

Con el descubrimiento de la expansión acelerada y su explicación en términos de la energía oscura, la situación ha cambiado drásticamente. Un universo abierto o plano se expandirá para siempre, con energía oscura o sin ella. Bajo la acción de la constante cosmológica o de un campo de quintaesencia, el ritmo de expansión aumentará con la edad del universo, alcanzando un estado de equilibrio carente de procesos o cambios. Las estrellas agotarán su combustible nuclear y dejarán de brillar; hasta los agujeros negros acabarán evaporándose al cabo de muchos trillones de años. Los protones se desintegrarán y el universo acabará siendo casi un vacío frío poblado por electrones y fotones muy separados entre sí, donde nada ocurrirá, y con la energía uniformemente repartida.

El Gran Desgarro (*Big Rip*)

Los valores del parámetro $w < -1$ se corresponden con una expansión superacelerada del cosmos. En este régimen, la energía oscura es conocida como «energía fantasma», dando lugar a un final catastrófico del universo, con el espacio expandiéndose a un ritmo tal que todas las estructuras del macrocosmos y del microcosmos, una tras otra, acabarán por disgregarse hasta sus últimas consecuencias.

Empezando por las galaxias, estrellas, planetas, cuerpos de mayor a menor tamaño, moléculas, átomos... hasta los hadrones terminarían por disgregarse, pues no habría fuerza —ni siquiera la fuerte— capaz de compensar la repulsión causada por la energía fantasma. Se trata del *Big Rip*, el Gran Desgarro. En contraposición a la evolución de un universo abierto ordinario, tal final catastrófico en el que cualquier intervalo del espacio se hace infinito tendría lugar tras un tiempo finito, según algunos modelos dentro de unos veinte mil millones de años.

El tiempo se acaba

Aristóteles dedujo, por un puro razonamiento lógico, que el tiempo no podía tener ni principio ni fin. Kant consideró la cuestión como una antinomia, es decir, una contradicción entre dos principios, lo que permite argumentar a favor y en contra. Son dos ejemplos entre tantos pensadores que han abordado esta pe-liaguda cuestión.

En física, conceptos tales como las magnitudes físicas, entre ellas el tiempo, suelen vincularse al procedimiento de su determinación empírica. Desde una perspectiva positivista, la existencia del tiempo depende estrechamente de la presencia de un reloj que lo mida. Con «reloj» nos estamos refiriendo no solo a un artificio mecánico que hace tictac, sino a cualquier sistema cíclico, como por ejemplo el sistema Tierra-Sol, o un reloj atómico.

Pero ¿qué sucedería si todos los artífices del universo para medir el tiempo, simples o complejos, dejaran de hacer tictac? Muchos cosmólogos piensan que el propio tiempo desaparecería, perdiendo su sentido. La expansión acelerada del universo acabaría, por tanto, con cualquier forma de materia organizada, en una nada atemporal.

Universo cíclico u oscilante (*Big Bounce*)

Ya en 1922, el físico y matemático ruso Alexander Friedman propuso un modelo cosmológico compatible con la relatividad general de Einstein, en el que una sucesión interminable de *big bangs* y *big crunches* tiene lugar a lo largo del tiempo, sin principio ni fin. En cada rebote se produciría una singularidad espaciotemporal donde la teoría de Einstein no es válida, por lo que el modelo no lo puede justificar.

Otra dificultad no menos grave es cómo abordar el aumento imparable de la entropía, rebote tras rebote. El físico estadounidense Richard Tolman propuso en 1934 una modificación del modelo de Friedman, cambiando la materia —que era polvo— por un nuevo tipo de material gravitatorio con un grado de libertad adicional para poder acomodar el aumento de entropía. En el modelo de Tolman hay ciclos como en el de Friedman, pero los universos sucesivos se harían mayores en cada rebote.

Con el descubrimiento de la aceleración del universo, un universo cíclico «al estilo Tolman» está descartado hoy en día. No obstante, más allá del modelo estándar existen teorías que lo predicen, basadas, como vimos, en la teoría cuántica de lazos o en la teoría de cuerdas.

Multiverso: diferentes finales

Aunque nuestro universo pudiera tener cualquiera de los finales señalados anteriormente (a cual más apocalíptico), debemos con-

templar la situación desde la perspectiva de que es una variante más de un número, probablemente infinito, de otros universos, que podrían tener leyes físicas diferentes y, por tanto, diferentes destinos. Tenemos el universo que «nos ha tocado tener».

Resulta cuanto menos llamativo que según la interpretación de la mecánica cuántica, ciertos modelos cosmológicos que preconizan la inflación eterna y los universos burbuja, o la teoría de cuerdas desde el lado de la física de partículas, conduzcan todos ellos al concepto del multiverso. En opinión de algunos científicos y filósofos de la ciencia, esto no puede ser una casualidad, sino que revela la necesidad de aceptar un nuevo paradigma, una nueva manera de interrogar a la naturaleza, que abordamos a continuación.

¿EL FIN DE LA CIENCIA EMPÍRICA?

El método científico, con el sustancial engarce experimento-teoría ha resultado extraordinariamente fructífero para descifrar los enigmas de la naturaleza y formular sus leyes. En general, el prestigio social de la ciencia es enorme, lo que en ocasiones conlleva el uso fraudulento de un lenguaje pseudocientífico como una cortina de humo de ciertas doctrinas pretendidamente científicas. Es preciso, pues, dotar a la ciencia de algún criterio para evaluar si cierta teoría puede considerarse como una teoría científica.

En la década de 1930, el filósofo de la ciencia Karl Popper planteó la refutabilidad o falsabilidad como condición *sine qua non* en cualquier teoría para ser considerada como científica: su capacidad para realizar predicciones contrastables empíricamente. Conviene destacar que no basta con lograr acuerdos cualitativos, se requieren técnicas estadísticas exigentes a la hora de contrastar las predicciones teóricas con los resultados experimentales u observacionales.

En general, no es difícil probar que ciertas doctrinas son acientíficas: es el caso de la astrología, la pseudociencia por antonomasia. Sin embargo, puede darse el caso de predicciones

de modelos o teorías científicas que se hallen en el límite del conocimiento y, en consecuencia, resulten difíciles de verificar. Existen, además, conjeturas teóricas no probadas debido a su dificultad matemática o conceptual. Hemos visto algunas a lo largo de este libro, como el confinamiento de los quarks en los hadrones o el principio de censura cósmica de las singularidades espaciotemporales. Los extraordinarios logros de las teorías subyacentes (cromodinámica cuántica y relatividad general, respectivamente) no hacen dudar ni un segundo de su científicidad, pero las anteriores conjeturas ponen de manifiesto algunos límites, temporales posiblemente, del conocimiento de la naturaleza.

Consideremos la cuestión de las dimensiones espaciales extra, predichas por la teoría de cuerdas, que quizá sean imposibles de detectar con los medios técnicos actuales. ¿Es lícito suponer que la teoría es irrefutable y, por ende, acientífica?

Históricamente, ha habido propuestas cuya comprobación empírica ha tardado años en llegar. La propia teoría atómica es un ejemplo, pues durante milenios incluso sus entonces escasos partidarios pensaban que quedaba fuera de la comprobación experimental. A principios del siglo xx incluso hubo científicos de la talla de Ernst Mach que consideraban su existencia como una cuestión metafísica, improbable. Otro ejemplo más cercano es el neutrino, postulado por Wolfgang Pauli para explicar el espectro continuo de la energía de los electrones y positrones en la desintegración beta de los núcleos atómicos, considerado al principio como prácticamente indetectable.

Ahora bien, en el caso de la teoría de cuerdas las manifestaciones fenomenológicas propias de las cuerdas sucederían en general para valores de energía tan gigantescos que jamás se van a poder comprobar en un laboratorio o un acelerador, a diferencia de lo que sucedió con el neutrino, detectado en 1956 por Clyde Cowan y Frederick Reines en un reactor nuclear.

No obstante, existen algunas opciones intermedias, predicciones que no se puede decir que sean exclusivas de la teoría de

Si estamos solos en el Universo, sería una terrible pérdida de espacio.

CARL SAGAN

cuerdas, pero sí uno de sus ingredientes principales. Nos estamos refiriendo en concreto a la supersimetría, que surge como una necesidad de coherencia de la teoría de cuerdas, aunque bien podría darse en la naturaleza sin que las cuerdas existieran. Así, muchas extensiones del modelo en física de partículas, que nada tienen que ver con la teoría de cuerdas, incorporan la supersimetría en su formulación.

Desgraciadamente, hasta el momento las grandes colaboraciones del LHC no han hallado rastro alguno de partículas supersimétricas, pese a haberse realizado una búsqueda concienzuda. ¿Representa este fracaso un duro golpe para los modelos de partículas más allá del modelo estándar, que propugnan un límite superior del orden del TeV, a partir de sus propios cálculos? Desde luego que sí, ya que su escala típica es del orden del TeV como se deriva de su propia consistencia. ¿Elimina este fracaso la teoría de cuerdas? ¡En absoluto! Basta, en este caso, suponer que la escala de energía para la manifestación de la supersimetría en nuestra brana-universo se encuentra por encima de la energía liberada en el colisionador, para sortear ese fracaso experimental.

El ejemplo anterior testimonia una actitud, por parte de los partidarios de la teoría de cuerdas, que puede resultar aún más desconcertante que la anterior dificultad casi insalvable relacionada con el avance tecnológico para la detección de los fenómenos. Consiste en renunciar, conscientemente, a cualquier tipo de predicción empírica acerca de las leyes fundamentales de la naturaleza, dada la libertad para la elección de los parámetros. Ante tal planteamiento, no es de extrañar que una buena parte de la comunidad científica se haya tornado desconfiada, e incluso hostil.

¿QUO VADIS FÍSICA?

Habiéndose puesto en cuestión el método científico convencional por los partidarios de la teoría de cuerdas, podemos generalizar la pregunta: ¿desvelará alguna vez el universo todos sus enigmas a la mente humana?

Conviene destacar la aplicación habitual en ciencia del reduccionismo, explicar el todo en función de las partes. Los denominados fenómenos emergentes introducen un nuevo elemento en la descripción reduccionista común, más allá de la complejidad del fenómeno. Un ejemplo paradigmático es la consciencia, resultado de la actividad cerebral, y la posibilidad de que emerja a partir de mecanismos cibernéticos. En física, se argumenta en ciertas teorías, como la gravedad cuántica de lazos, que el propio espacio-tiempo es una estructura emergente por encima de la longitud de Planck. La emergencia se presenta, en ciertos límites, como una alternativa al reduccionismo extremo.

Entonces, la pregunta que surge es: ¿habrá un límite de la aplicación del reduccionismo al conocimiento de la naturaleza? Si fuera así, supondría un importante giro en el método científico, que quizá podría ayudar a entender aparentes paradojas y prejuicios, como por ejemplo el multiverso.

Si en cada variante del multiverso se diera un conjunto de parámetros y leyes físicas diferente entonces carecería de sentido preguntar, por ejemplo, por qué la masa del protón es la que es. En otro universo, podría tomar otro valor. Como mucho, se podría argumentar que los valores de los parámetros del modelo estándar y del modelo estándar cosmológico están condicionados por el principio antrópico, que, como se comentó al final del capítulo anterior, relaciona las características del universo con la existencia del ser humano y su capacidad de percibirlo. La distribución de los valores de los parámetros entre las distintas variantes del multiverso bien podría deberse al azar, como una especie de lotería cósmica, lo que produce cierta desazón en mentes exigentes y sanamente escépticas.

Por otro lado, como pone de relieve el filósofo español Jesús Mosterín, aunque exista teóricamente un amplio abanico de versiones de universos «listos para materializarse», no existe claramente la necesidad de que esto suceda. Llegados a este punto,

Lo más incomprensible del
Universo, es que sea comprensible

ALBERT EINSTEIN

los partidarios del multiverso reciben un apoyo procedente de la cosmología: la inflación eterna que origina, de manera espontánea, un número infinito de universos burbuja que pueden dar cobijo a las posibles versiones teóricas del multiverso. El argumento se cierra mediante el principio antrópico: la vida inteligente solo se desarrollará en aquellos universos donde los parámetros y leyes físicas así lo permitan. El aparente ajuste de las leyes y parámetros se debe a que vivimos en un universo donde ha tocado la lotería cósmica o, mejor dicho, uno entre muchos universos donde otras inteligencias se estén formulando la misma pregunta.

Este panorama de casi infinitas posibilidades para las leyes de la física y los parámetros de la naturaleza no suele dejar indiferente a quien lo conoce, científico o no, siendo actualmente objeto de una intensa y prolongada controversia. Sus seguidores defienden que hay que superar la filosofía popperiana estricta que exige la refutabilidad o falsabilidad de cualquier teoría mediante la comprobación empírica como único criterio para su validación como teoría científica. Por ejemplo, aducen cualidades intrínsecas de una teoría, tales como su consistencia o poder unificador, explicaciones inesperadas de otros fenómenos físicos —como es el caso de la entropía en los agujeros negros—, su belleza, o incluso la falta de alternativas.

También se argumenta que el poder de resolución del criterio de Popper es excesivamente grueso a la hora de distinguir entre teorías con un mayor o menor grado de confirmación empírica. Aplicar tal criterio demasiado pronto en alguna rama de investigación podría ser contraproducente, desechando alguna buena idea sin tiempo suficiente para ser desarrollada.

Así pues, el problema planteado en estos momentos podría no ser tanto si la teoría de cuerdas es científica o no, sino si cabe justificar la confianza de una parte considerable de la comunidad científica y seguir invirtiendo tanto esfuerzo y talento en esa línea de investigación.

Por otro lado, los detractores de la teoría de cuerdas, cuyo número ha ido en aumento en los últimos años, denuncian los anteriores planteamientos sobre belleza, consistencia, etc., como

ilegítimos en ciencia si se toman aisladamente de la verificación empírica. Por ejemplo, la cuestión del principio antrópico es uno de los puntos más débiles, pues generalmente se utiliza como último recurso, es decir, cuando los métodos convencionales han fallado buscando una única teoría del todo, y no al revés. Como defiende Smolin, sí que podría haber una alternativa a la teoría de cuerdas que explique lo especial de nuestro universo, pero sin recurrir a tan incómodo principio.

Entra dentro de lo posible que la teoría de cuerdas sea, en realidad, una bella teoría matemática; que se realice o no en el mundo físico es otra cuestión. Pero la pregunta capital a la que nos aboca la teoría de cuerdas es si el método científico, que tan bien ha funcionado durante siglos, debe evolucionar o no, ampliando los criterios de refutabilidad según las líneas de pensamiento esbozadas antes.

Negar que el método científico deba evolucionar, y por tanto mantener que el método de Popper es el único criterio para certificar la bondad de una teoría, también podría calificarse como poco científico, como un prejuicio de la propia comunidad científica. Por otro lado, tendencias hasta ahora mayoritarias en física del microcosmos, como el reduccionismo extremo, deberán también replantear su margen de validez.

Afirmar que el método científico debe evolucionar, recogiendo algunas de las propuestas no empíricas de legitimidad, puede resultar enriquecedor pero también peligroso, más aún en una época en la que la ciencia está sometida a ataques por parte del pensamiento simple, irracional y fundamentalista.

La respuesta está en el futuro.

- AZCÁRRAGA, J.A. DE, *En torno a Albert Einstein. Su ciencia y su tiempo*, Valencia, Publicacions de la Universitat de València, 2007.
- CASAS, A., *La materia oscura*, Barcelona, RBA, 2015.
- CASAS, A. Y RODRIGO, T., *El bosón de Higgs*, Madrid, CSIC, 2012.
- FERNÁNDEZ BARBÓN, J.L., *Los agujeros negros*, Madrid, CSIC, 2014.
- GREENE, B., *El universo elegante*, Barcelona, Crítica, 2006.
- HAWKING, S. Y MLODINOW, L., *El gran diseño*, Barcelona, Crítica, 2010.
- IJJAS, A., LOEB, A. Y STEINHARDT, P., *La burbuja de la inflación cósmica*, Barcelona, Investigación y Ciencia, abril 2017.
- NAVARRO, J., *Schrödinger: una ecuación y un gato*, Tres Cantos (Madrid), Nivola, 2009.
- PASTOR, S., *La nucleosíntesis*, Barcelona, RBA, 2016.
- PENROSE, R., *Los ciclos del tiempo: una extraordinaria nueva visión del universo*, Barcelona, Debate, 2010.
- RODRÍGUEZ-QUINTERO, J., *Mundos paralelos*, Barcelona, RBA, 2015.
- SAMBURSKY, S., *El mundo físico de los griegos*, Madrid, Alianza, 1999.
- SMOLIN, L., *The trouble with physics*, Boston, Houghton Mifflin Company, 2007.

- agujero negro 11, 30, 36-38, 47-49,
113, 122-126
- Albrecht, Andreas 101
- antibarión 74, 128
- antimateria 28, 72, 73, 98, 102
- Aristóteles 7, 54, 138, 144
- barión 61, 62, 74, 128
- BICEP2 49, 50, 107
- Big Bang 9, 15, 19, 22, 24,
26-33, 35, 36, 42, 49, 53, 74,
79, 82, 84, 89, 90, 92, 97-99,
101, 102, 104, 112, 114, 115,
117, 118, 121, 123, 126, 128,
138, 143, 145
- bosón de Higgs 63, 70, 71, 79, 80,
81, 100
- brana 116, 117, 137, 141, 148
- campo
cuántico 64, 65, 67, 68, 78, 93,
100, 101, 108
- de Higgs 70, 71, 78, 83, 100, 139
- gauge 66, 67
- inflacionario 108, 115, 142
- cefeidas 21, 22
- CERN 25, 53, 81, 82, 98
- color 58, 62, 67, 74
- confinamiento 58, 59, 74, 147
- constante
cosmológica 20, 25, 100, 132,
134-137, 139, 142, 143
- de Hubble 22, 24, 113, 129,
132
- de Planck 94
- cromodinámica cuántica 82, 147
- cuásar 32, 34, 36, 37, 39, 44
- cuerda 116, 117, 140, 141, 148
- desplazamiento hacia el rojo
21-24, 27, 134
- Dicke, Bob 28
- Dirac, Paul A.M. 71-73, 76
- mar de 72, 73, 76

efecto Doppler 21, 27
 efecto túnel cuántico 100, 103
 Einstein, Albert 9, 20, 25, 28, 43,
 55, 94, 100, 122, 127, 132, 135,
 138, 145
 energía oscura 9, 25, 78, 102,
 105, 122, 128-135, 138, 139,
 142-144
 fantasma 144
 entropía 112-114, 124-126, 143,
 145, 150
 estrellas de primera generación
 32-35, 38
 Everett III, Hugh 110
 expansión (del universo) 19, 20,
 22-28, 33, 98, 100-102, 104, 113,
 122, 132, 133, 142, 143
 acelerada 9, 25, 78, 128,
 132-138, 143-145
 Faraday, James 67
 Feynman, Richard 8, 73
 flecha del tiempo 110, 112, 114,
 fondo cósmico de microondas
 (FCM) 11, 16, 26, 28, 30, 31,
 33, 34, 37, 42, 49, 50, 53, 104,
 106, 108, 113, 114, 127, 130,
 131, 134
 Friedman, Alexander 28, 145
 GEO 600 (observatorio) 48
 gluon 61, 63, 67, 69, 75, 78, 82,
 84, 117
 Gran Desgarro (*Big Rip*) 144
 Gran Implosión (*Big Crunch*)
 115, 129, 143, 145
 Gran Rebote (*Big Bounce*) 114,
 115, 121, 145
 Gran Unificación 90, 95, 96, 98, 99
 gravitón 10, 63, 117, 140, 141
 Guth, Alan 99, 100, 101
 hadrón 56-59, 61, 62, 74, 82, 144, 147
 Hawking, Stephen 92, 124
 radiación de 9, 124, 125
 heterogeneidad del FCM 30, 106
 horizonte de sucesos 123, 124
 Hubble, Edwin 17, 20-22, 24, 25,
 132
 ley de 24
 telescopio espacial 44, 127
 inflación 11, 15, 26, 28, 32, 49, 50,
 53, 78, 80, 84, 90, 95, 98-102,
 104, 106-108, 112, 114, 115, 131,
 142
 antigua 101, 103
 eterna 108-111, 146, 150
 nueva 102, 103
 inflatón 101-103, 106, 107, 115,
 118, 139, 142
 Gran Muralla 41, 53
 leptón 56, 59, 60, 62, 63, 66, 70, 84
 Lemaître, Georges 28
 LHC 28, 53, 70, 71, 79-82, 95, 98,
 104, 141, 148
 LIGO 45-49
 Linde, Andrei 101
 MACHO 29
 materia
 bariónica 129, 133, 134
 oscura 16, 17, 29, 33, 40-42, 82,
 102, 128, 131, 133, 142
 Maxwell, James Clerk 8, 43, 67
 modelo estándar 11, 59, 60, 62,
 63, 70, 79, 81, 82, 84, 95-97,
 101, 116, 133, 138, 140-142,
 145, 148, 149
 cosmológico 128, 129, 134,
 135, 149
 monopolos magnéticos 98

muerte térmica del universo 143
 multiverso 10, 105, 109-111, 126,
 145, 146, 149, 150
 ondas gravitatorias 19, 43-50,
 104, 107, 108
 Oppenheimer, Robert 72, 123
 paradoja
 de Olbers (noche oscura) 18
 del gato de Schrödinger 8,
 110
 Peebles, Jim 28
 Penrose, Roger 92, 123
 Penzias, Arno 26, 28, 30, 37
 Planck
 era de 90, 92, 94-97
 longitud de 95, 96, 115, 136,
 137, 140, 149
 satélite y misión 30, 50, 127,
 129, 130
 Popper, Karl 146, 150, 151
 positrón 28, 72-74, 76, 147
 principio
 antrópico 10, 85, 126, 149-151
 de censura cósmica 123, 147
 cosmológico perfecto 26
 de incertidumbre 136
 púlsar 43, 44, 46, 48
 quintaesencia 134, 138, 139, 142,
 143
 recalentamiento 28, 90, 98, 102,
 103, 107, 112, 114, 115
 recombinación 30, 34, 50, 53,
 134, 135
 renormalización 77
 ruptura de simetría 70, 71, 78,
 90, 102
 sabor 62, 63

simetría gauge 66, 70, 96
 singularidad 89-92, 104, 114-116,
 118, 123, 126, 128, 143, 145,
 147
 Smolin, Lee 126, 151
 Steinhardt, Paul J. 101, 107
 supersimetría 116, 141, 148
 supervacio 42, 43
 Susskind, Leonard 126
 Tegmark, Max 111
 teoría
 cuántica de campos 67, 69, 76,
 128, 136
 de cuerdas 10, 62, 81, 95, 111,
 116, 118, 126, 128, 137, 140,
 141, 145-148, 150, 151
 de la gravedad cuántica de
 lazos 10, 63, 89, 92, 95, 127,
 149
 de la relatividad 9, 10, 20, 27,
 28, 31, 34, 43, 46, 48, 69, 89,
 91, 92, 94-96, 115, 122-124,
 127, 128, 130, 132, 135, 138,
 145, 147
 del todo 10, 95, 116, 138, 140,
 151
 universo
 abierto 129-131, 143, 144
 cerrado 19, 129-131
 plano 20, 32, 99, 130, 131, 135
 vacío 9, 26, 30, 43, 54, 55, 69-73,
 76-79, 93, 99-103, 107, 124, 132,
 136-139
 Virgo (observatorio) 45, 48
 Wheeler, John A. 36, 123, 124
 Wilson, Robert 26, 28, 30, 37
 WMAP, satélite 42, 127, 130

Los límites del universo

Los límites del universo coinciden con las fronteras del conocimiento científico, desde la física de partículas elementales (microcosmos) hasta la astrofísica y la cosmología (macrocosmos). Este libro aborda, desde una perspectiva moderna, preguntas fundamentales que el hombre siempre se ha hecho: ¿cuál es el origen del universo y su posible final?; ¿por qué ha sido posible la vida? También examina con rigor pero sencillez la existencia de más universos paralelos al nuestro y sus implicaciones.

Miguel Ángel Sanchis Lozano es catedrático de Física Teórica e investigador en el Instituto de Física Corpuscular (CSIC-Universidad de Valencia).